

ISSN 2782-3237

# Экологический мониторинг и моделирование экосистем

Environmental Monitoring  
and Ecosystem Modelling

Том XXXVII № 1-2

2026



Москва 2026

Federal State Budgetary Institution  
«Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology»  
(FSBI «IGCE»)

**ENVIRONMENTAL MONITORING  
AND ECOSYSTEM MODELLING**

Volume XXXVII

№ 1-2

Moscow 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Институт глобального климата и экологии  
имени академика Ю.А.Израэля»  
(ФГБУ «ИГКЭ»)

—көйөснѳігкнѳ ѳөцнѳөгнѳс  
нѳ ѳііньгөснѳнѳ —көгнѳѳі ѳ

Том XXXVII № 1-2 2026 год

Научный редактор: Т.Г. Махрова

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

И.М. Брускина,

Л.В. Кудрявцева

Верстка: Л.А. Прохорова

Фото на обложке:

А.И. Нахутин

Свидетельство о регистрации СМИ: от 15.03.2021 г.  
Эл № ФС 77-80601

Адрес редакции:

РФ 107258 г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

Свободная цена

Москва 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
"Институт глобального климата и экологии  
имени академика Ю.А.Изразля"  
(ФГБУ "ИГКЭ")

# **ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ**

Том XXXVII

№ 1-2

Москва 2026

---

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

**Том XXXVII № 1-2 2026 г.**

Научный журнал, публикующий статьи о методах и результатах мониторинга загрязнения и состояния окружающей среды, по сопряженным вопросам моделирования. Публикуются также статьи о системах мониторинга и их функционировании, информационные материалы. Издание «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем» выпускается с 1978 г. года. Для экологов, климатологов и специалистов в области охраны окружающей среды.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** Романовская А.А. (главный редактор), Брынцев В.А., Гинзбург В.А., Глазунов Ю.Б., Громов С.А., Есеркепова И.Б., Козулин А.В., Кухта А.Е. (зам. главного редактора), Лысенко А.В., Минин А.А., Мокиевский В.О., Назырова Р.И., Ольчев А.В., Папич Л., Разумовский Л.В., Махрова Т.Г. (научный редактор), Терехович Т.И., Тихонова И.О., Тишков А.А., Трунов А.А. (ответственный секретарь), Шварц Е.А., Шуйская Е.А.

Все статьи рецензируются.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258 Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Трунову А.А.; e-mail: pemme@inbox.ru. Правила оформления рукописей и их представления для публикации – см. <http://www.igce.ru/>.

© Оформление издания: ФГБУ «ИГКЭ», 2026

---

## ENVIRONMENTAL MONITORING AND ECOSYSTEM MODELLING

**Volume XXXVII № 1-2 2026**

A scientific journal publishing papers on methodologies and results of monitoring of pollution and state of the environment, as well as on associated modelling issues. Papers on monitoring systems and their functioning, and information materials are also invited. Published since 1978. The journal may be of interest for ecologists, climate scientists and experts in protection of the environment.

**EDITORIAL BOARD:** Romanovskaya A.A. (editor-in-chief), Bryntsev V.A., Ginzburg V.A., Glazunov Yu.B., Gromov S.A., Yesserkepova I.B., Kozulin A.V., Koukhta A.E. (deputy editor-in-chief), Lysenko A.V., Minin A.A., Mokievsky V.O., Nazyrova R.I., Olchev A.V., Papic L., Razumovsky L.V., Makhrova T.G. (science editor), Terekhovitch T.I., Tikhonova I.O., Tishkov A.A., Trunov A.A. (assistant editor), Shvarts E.A., Shouyskaya E.A.

All papers are subject for peer-reviewing.

Primary submission of manuscripts: Trunov A.A., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258 Moscow, Russian Federation; e-mail: pemme@inbox.ru. Rules for the preparation and submission of manuscripts are available at <http://www.igce.ru/>.

© Design: FSBI "IGCE" 2026

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### **СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ**

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Памяти Сергея Ивановича Авдюшина..... | 5 |
|---------------------------------------|---|

### **ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Максимова О.В., Шпер В.Л.**

|                                                                                                    |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Проблемы принятия решений на основе P-VALUE<br>и уровня значимости в прикладных исследованиях..... | 9 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

**Попов Н.В., Миронов А.А., Сингх А.К.**

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Обзор среднего состава газа угольных пластов<br>по странам и макрорегионам..... | 21 |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|

**Морозова М.В., Фролова М.А., Айзенштадт А.М.,  
Тарасенко А.А., Жеребцов А.А.**

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами<br>почвенного покрова острова Большой Соловецкий..... | 46 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### **ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ МОНИТОРИНГА**

**Алексеева А.В., Григорьев М.Р., Старостин Е.В., Петров Р.Е.,  
Мордовской П.Г., Максимов Т.Х.**

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Динамика концентрации CO <sub>2</sub> по данным самолетных наблюдений<br>над Центральной Якутией за 2018-2020 гг..... | 66 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**Ильин И.С., Галушин Д.А., Громов С.А., Жигачёва Е.С.**

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Использование данных измерений концентраций в воздухе<br>и осадках для модельной оценки поступления соединений серы<br>и азота из атмосферы в Байкальской природной территории..... | 81 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**Климов А.В., Перфильев Е.Е., Стадникова К.В., Тихонова И.О.**

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Восстановление нарушенных земель: использование<br>автохтонных почв для создания зонального разнообразия<br>в искусственных насаждениях..... | 119 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**Новикова Л.В., Степанова Н.Ю.**

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Использование многомерного анализа для выделения<br>гидрохимических маркеров антропогенного воздействия..... | 133 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### **ОБЗОРЫ**

**Максимович М.М., Прохоцкая М.А., Шнитко С.Н., Сачек М.М.,  
Терехович Т.И.**

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Утилизация и обезвреживание лекарственных средств<br>как основа экологической безопасности в республике Беларусь..... | 156 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### **СООБЩЕНИЯ**

**Росеро Вальехо М.Л., Хлебосолова О.А.**

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Использование данных дистанционного зондирования<br>для экологического мониторинга атмосферного воздуха охраняемых<br>природных районов Галапагос..... | 171 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

---

---

## CONTENTS

### *EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES*

|                                              |   |
|----------------------------------------------|---|
| In memory of Sergei Ivanovich Avdyushin..... | 5 |
|----------------------------------------------|---|

### *STUDIES*

#### **Maksimova O.V., Shper V.L.**

|                                                                                              |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Decision making problems based on p-value<br>and significance level in applied research..... | 9 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---|

#### **Popov N.V., Mironov A.A., Singh A.K.**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Overview of the average coal seam gas composition by country and region..... | 21 |
|------------------------------------------------------------------------------|----|

#### **Morozova M.V., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M.,**

#### **Tarasenko A.A., Zherebtsov A.A.**

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Assessment of the level of heavy metal contamination<br>of the soil cover of Bolshoy Solovetsky Island..... | 46 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### *MONITORING*

#### **Alekseeva, A.V., Grigoryev, M.R., Starostin, E.V., Petrov, R.E.,**

#### **Mordovskoy, P.G., Maximov T.Ch.**

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Dynamics of CO <sub>2</sub> concentration: Aircraft measurements<br>over Central Yakutia during (2018-2020)..... | 66 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

#### **Ilyin I.S., Galushin D.A., Gromov S.A., Zhigacheva E.S.**

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Model estimates of atmospheric deposition of sulfur nitrogen<br>and nitrogen compounds to Baikal Natural Territory based<br>on observed concentration in air and precipitation..... | 81 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

#### **Klimov A.V., Perfilov E.E., Stadnikova K.V. Tikhonova I.O.**

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Disturbed land remediation: using indigenous soils<br>to create zonal diversity in artificial canopies..... | 119 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

#### **Novikova L.V., Stepanova N.Yu.**

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| Using multidimensional analysis to identify water pollution markers..... | 133 |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|

### *REVIEWS*

#### **Maksimovich M.M., Prakhotskaya M.A., Shnitko S.N., Sachek M.M.,**

#### **Tserakhovich T.I.**

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Disposal and neutralization of medicines as a basis<br>for environmental safety in the republic of Belarus..... | 156 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### *MESSAGES*

#### **Rosero Vallejo M.L., Khlebosolova O.A.**

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Using remote sensing data for ecological air monitoring<br>in Galapagos protected natural areas..... | 171 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

---

## СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

### Памяти Сергея Ивановича Авдюшина

*В марте 2026 года исполнилось бы 90 лет Сергею Ивановичу Авдюшину, который много лет был директором Института прикладной геофизики. Часть коллектива ИПГ послужила основой для формирования ФГБУ «ИГКЭ». Коллективы этих институтов тесно сотрудничали на протяжении многих лет, в частности, во время ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Памяти Сергея Ивановича посвящен материал, подготовленный Юрием Фёдоровичем Барабаничковым, главным специалистом ИПГ.*



В 2026 году, к 90-летию Сергея Ивановича Авдюшина, мы вспоминаем этого замечательного человека и учёного, доктора технических наук, профессора, академика РАЕН и до 2014 года директора Института прикладной геофизики им. Академика Е.К. Федорова.

Родился С.И. Авдюшин 19 марта 1936 года в Москве. Окончил Московский инженерно-физический институт. Ещё студентом, в 1959 году, он начал работать в Институте прикладной геофизики (ИПГ).

В это время, по поручению Игоря Васильевича Курчатова, Евгений Константинович Федоров организует наблюдения за загрязнениями окружающей среды в результате проведения ядерных взрывов. В 1956 г. он создаёт Институт прикладной геофизики. Задача Института – создание системы мониторинга загрязнения радиоактивными продуктами геофизических сред: поверхности Земли, атмосферы и околоземного космического пространства (ОКП). В Институт приглашаются молодые специалисты – выпускники Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ),

---

Московского геологоразведочного института (МГРИ), Ташкентского государственного университета, Московского инженерно-физического института (МИФИ) (в их числе С.И. Авдюшин).

Сергею Ивановичу была поручена работа совместно с кафедрой микро-радиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ), основателем и руководителем которой был профессор Валериан Орестович Вяземский.

С конца 60-х годов 20-го века коллективы ИПГ и ЛЭТИ выполняли работу государственной важности по созданию технических средств наблюдения за радиационной обстановкой в околоземном космическом пространстве на базе искусственных спутников земли – ИСЗ. Одним из первых разработанных приборов был 128-канальный амплитудный малогабаритный анализатор АМА-6, выполненный на транзисторах. Ряд технических решений обладали существенной новизной и были защищены авторскими свидетельствами СССР.

Большим достижением в совместной работе было создание опытного образца радиометрического комплекса (РМК) для установки на спутник «Космос-13» (апрель 1963 г.). Этот опыт взаимодействия помог успешному выполнению и следующих проектов – комплексов Р-10 для ИСЗ «Метеор–Природа» (1976), включавший в себя комплект детекторов излучений (ИПГ) и 3-х канальный регистратор – накопитель БАРС-3 (ЛЭТИ), созданных на элементной базе второго поколения, и РМС для ИСЗ «Электро», выведенного на геостационарную орбиту в октябре 1994 года.

Полученные результаты на этих космических аппаратах были использованы для обеспечения радиационной безопасности полетов космонавтов.

Влияние Солнца на безопасность космических полетов, на магнитосферу и биосферу Земли огромно, и поэтому для повышения надежности прогноза радиационной обстановки в космосе дополнительно была организована наземная сеть радиотелескопов. Сотрудники группы Ленинградского государственного университета (ЛГУ), возглавляемые заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, профессором А.П. Молчановым, в 1971 г. начали тесно сотрудничать с учеными ИПГ, которыми руководил С.И. Авдюшин. Была организована не только наземная сеть радиотелескопов, но и по инициативе Сергея Ивановича была создана радиослужба Солнца на научно-исследовательских судах Гидрометеослужбы, что позволяло вести наблюдение в периоды, когда с территории страны Солнца не было видно. Понятно, что наблюдать Солнце на радиотелескопе с относительно узкой диаграммой направленности в море невозможно в обычных условиях. Но совместной группе Ленинградского государственного университета и Института прикладной геофизики, возглавляемой С.И. Авдюшиным и А.П. Молчановым, удалось создать радиотелескоп, который непрерывно следил за Солнцем при любой качке корабля и при этом не использовал сложную (и в тот момент неработающую) гироскопическую систему стабилизации. В результате этих работ был подготовлен проект технического задания, на основании которого была утверждена федеральная целевая программа «Геофизика».

---

Красной строкой в славном трудовом пути Сергея Ивановича проходит его непосредственное участие в ликвидации последствий Чернобыльской аварии – взрыва атомного реактора, произошедшего в ночь на 26 апреля 1986 года на четвертом блоке Чернобыльской атомной станции – ЧАЭС. Под руководством Юрия Антониевича Израэля был создан коллектив из сотрудников Института прикладной геофизики, сотрудников Лаборатории мониторинга природной среды и климата, и сотрудников НПО «Тайфун» для контроля загрязнения окружающей среды радиоактивными продуктами в результате Чернобыльской катастрофы. Они выполняли работы по контролю загрязнения радиоактивными продуктами от ядерных взрывов (Стукин Евгений Данилович, Колосков Игорь Александрович, Иванов Андрей Борисович, Теверовский Ефим Наумович, Ровинский Феликс Яковлевич, Петров Виктор Николаевич, Вакуловский Сергей Мстиславович, Рябошапко Алексей Григорьевич, Артемов Евгений Михайлович, Николаев Анатолий Николаевич, Краса Александр и др.). Было организовано два штаба: один в Москве, возглавляемый Седуновым Ю.С., а второй в Чернобыле, который возглавлял Израэль Ю.А.



Чернобыльской группе было поручено обследование 30-ти километровой зоны и составление карты загрязнения. По результатам работы был выпущен «Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины»<sup>1)</sup>.

Сергей Иванович Авдюшин был одним из очень немногих людей, который мог принять необходимое решение в сложных ситуациях и добиться его выполнения, сохраняя спокойную доброжелательность. Выслушать, понять, принять решение и организовать его выполнение!!!

---

<sup>1)</sup> Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии / Под ред. Ю.А. Израэля. – Люксембург: Бюро официальных публикаций Европейской комиссии, 1998.



Дело, которому посвятил жизнь Сергей Иванович Авдюшин, продолжают сотрудники ИПГ. На последних двух снимках, сделанных на космодроме «Восточный» – подготовка к запуску спутника «Метеор 2-4» в феврале 2024 года.

## Проблемы принятия решений на основе *P-VALUE* и уровня значимости в прикладных исследованиях

О.В. Максимова <sup>1,2)</sup>, В.Л. Шнер <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»,  
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б;

<sup>2)</sup>Университет МИСИС,  
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4

\*Адрес для переписки: o-maximova@yandex.ru

**Реферат.** Обсуждение корректности интерпретации результатов исследований на основе *p-value* научным сообществом в последние десятилетия явилось предметом интенсивных споров. В работе исследовано два основных вопроса: чем целесообразно руководствоваться при выборе уровня значимости при проверке гипотез и чем качественно отличается проверка гипотез с помощью выбора уровня значимости от использования величины *p-value*. Продемонстрировано, что выбор уровня значимости находится в зоне ответственности исследователя, имеет внестатистические обоснования и зависит от типа исследования. Показано, что алгоритмы принятия решений на основе *p-value* и уровня значимости различаются.

Помимо этого, в работе рассматриваются ошибки качественных выводов при принятии решений на основе как уровня значимости, так и значения *p-value*. Основной вывод, представленный в работе: ошибочным следует признать представление о том, что *p-value* или уровень значимости могут отражать как долгосрочные результаты эксперимента, так и доказательство отдельного результата по выборке. Никакие значения *p-value* и уровня значимости не проверяют и не оценивают вероятность истинности или ложности проверяемой гипотезы.

Для обеспечения более надежных выводов следует:

- проводить верификацию результатов каждый раз с помощью дополнительных опытов,
- учитывать результаты предшествующих исследований,
- понимать рамки ограничений полученных результатов,
- принимать во внимание вариабельность всех процессов.

**Ключевые слова.** *P-value*, уровень значимости, статистическая значимость, ошибки I и II рода, статистическая гипотеза.

## Decision making problems based on p-value and significance level in applied research

*O.V. Maksimova<sup>1), 2)</sup>, V.L. Shper<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,  
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

<sup>2)</sup> University of Science and Technology (MISIS),  
4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russian Federation

\*Correspondence address: o-maximova@yandex.ru

**Abstract.** The correct interpretation of *p-value*-based research results has been the subject of intense debate in the scientific community in recent decades. This paper examines two questions: what is the appropriate guideline for choosing a significance level when testing hypotheses, and how hypothesis testing using a significance level differs qualitatively from using a *p-value*. It is demonstrated that choosing a significance level is the responsibility of the researcher, has non-statistical justifications, and depends on the type of the study. It is shown that decision-making algorithms based on *p-value* and significance level are different.

Furthermore, the paper examines errors in qualitative inference when making decisions based on both significance level and *p-value*. The main conclusion of this paper is that the idea that a *p-value* or significance level can reflect both the long-term results of an experiment and be the proof of an individual sample result is erroneous. Neither *p-value* nor significance level verifies or evaluates the probability of the truthiness or falseness of the hypothesis being tested. To ensure more reliable conclusions, it is necessary to verify the results every time possible with additional experiments as well as take into account the results of previous studies, understand the limitations of the results found, and take into consideration the variability of all processes.

**Keywords.** *P-value*, significance level, statistical significance, type I and type II errors, statistical hypothesis.

*Во время экспериментирования начальная гипотеза никогда не  
доказывается и не устанавливается, но, возможно, не одобряется.  
Можно сказать, что каждый опыт существует лишь для того,  
чтобы дать фактам возможность проверить начальную гипотезу.*

*Р. Фишер, 1935 г.*

## Введение

При проверке статистических гипотез исследователь сталкивается с задачей назначения уровня значимости (вероятности ошибки I рода), т.е. веро-

ятности отклонить гипотезу, которой первоначально он придерживается, если на самом деле эта гипотеза истинна. Одновременно, он всегда рискует совершить ошибку II рода – отвергнуть альтернативную гипотезу, если она истинна. Английский статистик Рональд Фишер, разрабатывавший методы исследований для сельскохозяйственных полевых экспериментов, ввел в 1925 г. порог для уровня значимости, равный 0.05, пытаясь обеспечить баланс между ошибками I и II рода (Fisher, 1925):

*«Значение  $p = 0.05$  или 1 к 20 удобно брать как предел для оценки отклонения, позволяющий рассматривать его как значимое или нет. Таким образом, отклонения, превышающие стандартные величины отклонений в 2 раза, формально считаются значимыми».*

Выбор значения 0.05 был, строго говоря, произвольным. Однако в дальнейшем значение 0.05 получило широкое распространение при проверке статистических гипотез как эталонное. Такую популярность можно объяснить стремлением создания единого стандарта для облегчения сравнения результатов различных исследований, и потребностью в простом и понятном критерии для определения статистической значимости. При этом так часто используемое значение 0.05 в качестве уровня значимости оказалось вырванным из контекста размышлений Рональда Фишера и его научного друга Уильяма Госсета. Известный британский инженер-статистик Уильям Госсет, применявший статистические методы на множестве натуральных данных в экспериментальной лаборатории пивоварни Guinness<sup>1),2)</sup> в Дублине, и переписывавшийся много лет с Р. Фишером и К. Пирсоном, полагал, что концепция статистической значимости сама по себе должна быть неразрывно связана с поставленной практической задачей. В своих письмах к Рональду Фишеру он отмечал, что в зависимости от важности вопроса, стоящего перед исследователем, и особенностей выборки, уровень значимости может выбираться не одинаковым: бывают ситуации, в которых принятое значение 0.1 вполне уместно, а бывают, наоборот, когда значение, к примеру, 0.01 окажется недостаточным для получения достоверных практических выводов (Pearson et al., 1990).

Позднее, Рональд Фишер пришел к выводу, что необходимо отказаться от фиксированных уровней значимости, заменив их системой  $p$ -value как вероятности полученного по выборке результата или более экстремального, если первоначальная гипотеза верна (Fisher, 1956). Однако, и эту идею с течением времени стали воспринимать как некий эталонный подход к проверке статистических гипотез, широко распространенный как в учебном процессе, так и в прикладных исследованиях. Многие журналы стали принимать к публикации лишь те статьи, в которых присутствует  $p$ -value, которое как бы автоматически обосновывает научные результаты и выводы авторов (Шпер, 2021). И тогда термин «статистическая значимость» стал восприниматься авторами и рецензентами журналов как эквивалент научной доказательности

---

1) <https://www.guinness.com> (дата обращения 09.06.2025).

2) <https://priceconomics.com/the-guinness-brewer-who-revolutionized-statistics/> (дата обращения 09.06.2025).

---

выводов. Поэтому новая волна обсуждения корректности интерпретации результатов исследований на основе  $p$ -value всколыхнула научное сообщество в последние десятилетия и явилась предметом интенсивных споров (Goodman, 1999; Wasserstein, 2016; Amrhein, 2019; Шпер, 2021).

*Исследуем два основных вопроса:*

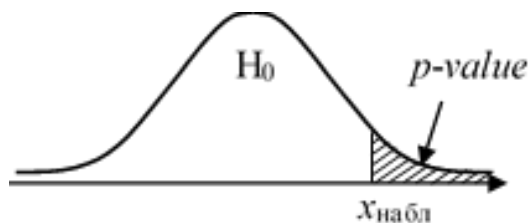
- чем целесообразно руководствоваться, выбирая уровень значимости при проверке статистических гипотез;
- чем качественно отличается проверка гипотез с помощью выбора уровня значимости от использования величины  $p$ -value.

## Методы и материалы

Опишем понятие величины  $p$ -value при проверке статистических гипотез.

Пусть исследователь придерживается некоторой гипотезы  $H_0$  (нулевая/основная гипотеза) (рис. 1). Ее проверка не может быть реализована без выдвижения альтернативной гипотезы  $H_1$ , которой будет следовать эксперт при отвержении основной гипотезы  $H_0$ . Чаще всего, следуя структуре большинства статистических критериев, основная гипотеза выдвигается простой, а альтернативная – сложной. Это связано с тем, что в основе критериев проверки основной гипотезы лежат законы распределения с фиксированными значениями параметров.

Выбирается статистический критерий, позволяющий проверить, согласуются ли выборочные данные с основной гипотезой. Критерий формирует статистику (функцию выборочных данных), которая имеет распределение  $F_0$ , если придерживаться гипотезы  $H_0$ . Согласно выбранному критерию, рассчитывается наблюдаемое значение критерия  $x_{\text{набл}}$ . Исходя из закона распределения  $F_0$ , для него есть значения, более и менее вероятные. Тогда при условии истинности гипотезы  $H_0$  на рис. 1 вероятность  $P(X \geq x_{\text{набл}})$  задает значение  $p$ -value. В общем случае можно сказать, что  $p$ -value количественно определяет вероятность наблюдения полученных результатов (или более экстремальных), если нулевая гипотеза верна. То есть это то значение уровня значимости, которое дала выборка (эксперимент).



**Рисунок 1.** Графическая интерпретация величины  $p$ -value ( $x_{\text{набл}}$  – наблюдаемое значение выбранной статистики,  $H_0$  – основная гипотеза, которой придерживается исследователь)

**Figure 1.** Graphical interpretation of the  $p$ -value ( $x_{\text{набл}}$  is the observed value of the selected statistic,  $H_0$  is the main hypothesis that the researcher adheres to)

## Результаты и обсуждение

Рассмотрим, с какой целью исследователь делает выборки и какие. Ответ на этот вопрос позволит разобраться с *первой задачей* исследования: чем целесообразно руководствоваться при выборе уровня значимости для проверки статистической гипотезы?

Научные исследования можно отнести к перечислительным или аналитическим (Адлер, 2020). Они преследуют совершенно разные цели: перечислительные исследования направлены на оценку параметров данной конкретной системы на основе результатов, как правило, случайного выборочного наблюдения, а аналитические направлены, в первую очередь, на предсказание поведения данных в будущем, т.е. прогноз. В первом случае изучаются данные в статике (изучается генеральная совокупность), во втором – данные в динамике (ход реального процесса).

В перечислительных исследованиях (и иногда в аналитических, если нас интересует выявление взаимосвязей некоторых параметров или их сравнение), какими бы небольшими не были рассчитываемые по выборке статистики, вопрос их значимости имеет значение (Rummel, 1976). Например, в экологических исследованиях часто ставится задача именно выявления факторов, влияющих на состояние окружающей среды, а не составления многопараметрических моделей с целью прогноза (Кухта и др., 2022; Кухта и др., 2024). Это связано с тем, что клубок взаимосвязей в природе очень многогранен и запутан, и многофакторные математические модели, как правило, в таких исследованиях очень сложны и рассматриваются редко. В таких случаях обнаруженные, к примеру, статистически значимые корреляции величиной 0.4 или 0.5 могут оказаться полезны, поскольку помогают верифицировать общие закономерности развития экосистем. Например, в работе (Кухта и др., 2022) на основе значимых на уровне 0.1 корреляций верифицируется выдвигаемая на основе многолетних наблюдений гипотеза о лимитирующей роли количества осадков для роста сосны обыкновенной в разных типах местообитаний, а в работе (Кухта и др., 2024) верифицируется гипотеза о влиянии выпадений соединений азота в фоновом районе загрязнения воздуха за счет трансграничного переноса на рост древостоев, где с помощью значимых корреляций подтверждается, что в бедной ресурсами среде обитания поступления в почву азота стимулируют рост деревьев в качестве биогенных элементов.

Однако, если нам нужны результаты для составления прогнозов, то, к примеру, корреляция выборочных данных с модельными, даже равная 0.8, может оказаться недостаточной, так как в таком случае процент объясненной дисперсии составляет лишь 64%, и остается высокая доля не связанных с выбранной моделью дисперсий (36%). Или другой пример: вряд ли кого-то удовлетворит прогноз, что дневная температура воздуха по городу в определенный день составит от 5°C до 19°C. Но еще сложнее, если полученные результаты должны стать основой для принятия управленческих решений. В таком случае приемлемым может быть только высокий процент объясненной дисперсии (как правило, 90% и более), а не просто статистически значимая

---

корреляция выборочных данных с математической моделью (с модельной ситуацией можно ознакомиться, к примеру, в работе Rummel, 1976). Таким образом, статистическая значимость, например, коэффициента корреляции, еще не означает сильную взаимосвязь изучаемых признаков, позволяющую составить надежный прогноз. Одной из задач, где значимых корреляций недостаточно для прогноза, является выбор глобальной климатической модели, наиболее точно воспроизводящей климат некоторого региона: от того, насколько точно выбранная модель будет объяснять вклад дисперсии натуральных данных, может зависеть социально-экономический путь развития региона (Klimont et al., 2017; Максимова, 2025).

Приведем пример, когда вне зависимости от выбранного уровня значимости можно получить ложные умозаключения. Ситуация касается сравнения двух выборок, относящихся к разным отрезкам времени, что требует как глубокого знания условий отбора, так и иногда специальных методов и подходов статистического анализа (Максимова, 2025). Опишем пример, приведенный в работе (Шпер, 2021). Пусть на предприятии уровень брака продукции за какой-то предыдущий временной промежуток был равен 2%, и пусть недавно открылось производство на новой площадке. Естественно, есть желание убедиться, что качество не пострадало. Для этого делается новая выборка, в которой обнаруживается 4.2% бракованных изделий. На основе этих данных нам нужно ответить на вопрос: изменилось ли качество продукции? С математической точки зрения на основании анализа выборок необходимо решить задачу: значимо статистически различие между 4.2 и 2% или нет? Основная проблема принятия решения по результатам проверки такой гипотезы заключается в том, что выводы делаются, предполагая сохранение условий эксперимента, что подразумевает неизменность всей системы, в рамках которой получены наши эмпирические данные. Однако, выполнение этого условия маловероятно, так как мы должны убедиться, что новые изделия сделаны из таких же материалов, точно такого же качества, на том же оборудовании, теми же операторами, при тех же прочих условиях окружающей среды, причем были отобраны теми же способами, что и все предыдущие, точно так же измерены и т. д. (Шпер, 2021). Поэтому к выводам, сделанным с помощью некоторого статистического критерия при выбранном уровне значимости, вне зависимости от его величины необходимо относиться с большой осторожностью, изучив предварительно всю систему во времени или использовать дополнительные инструменты для сравнения (Максимова, 2025).

### ***Подведем итоги:***

Выбор уровня значимости при проверке статистической гипотезы зависит от типа исследования. Для перечислительных исследований можно ориентироваться на традиционно используемые значения; для аналитических исследований это решение, которое должен принимать исследователь, исходя из сущности данных и важности прогноза. К традиционным значениям 0.1 и/или 0.05 в этих случаях следует относиться с осторожностью. Никакие сколь угодно малые значения выбранных уровней значимости не дают никаких точных гарантий.

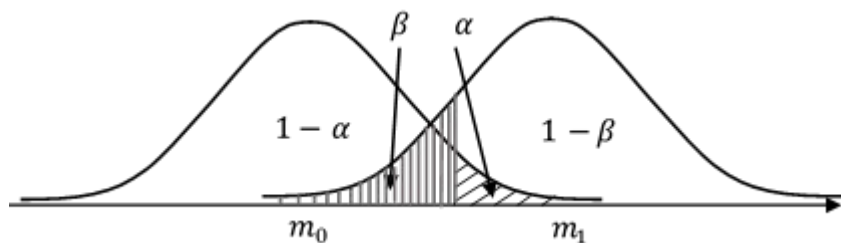
Уровень ошибки принятия гипотезы выбирается исследователем и имеет внестатистические обоснования. Интуиция и знание процесса/совокупности при выборе уровня значимости и интерпретации результатов являются первоочередными: Рональд Фишер в беседе с Крамером отметил «*Меня иногда обвиняют в интуиции как в преступлении*», имея ввиду, что интуиция в выборе подхода исследования (математической модели) вырабатывается на основе предварительного тщательного знакомства с выборкой (Шейнин, 2008).

Теперь перейдем к рассмотрению *второй задачи* исследования. Чем качественно отличается проверка гипотез с помощью выбора уровня значимости от использования величины *p-value*? Несмотря на сходство структуры показателей уровня значимости и *p-value*, принятие решений на основе этих двух характеристик различается. При использовании *p-value* самое распространенное заблуждение заключается в том, что величина  $(1 - p\text{-value})$  рассматривается как вероятность того, что основная гипотеза верна. Такой подход может привести к большому числу ложных заключений относительно дальнейших, основанных на этом выводе, решений. На самом же деле *p-value* показывает лишь вероятность наблюдаемого в выборке, или более экстремального, значений, если основная гипотеза истинна (рис. 1). Проверка гипотез на основе использования *p-value* – это практический подход, статистические свойства которого выводятся из бесконечной генеральной совокупности, применяемый к любому единичному эксперименту. Теория проверки гипотез при заданном уровне значимости предполагает следование правилу поведения, которое при повторении экспериментов гарантирует исследователю, что он может ошибаться, но при этом достаточно редко. Проверка гипотез сама по себе не предоставляет доказательств истинности или ложности конкретного суждения, как отмечал Рональд Фишер (Fisher, 1935). Путаница между подходами возникает из-за того, что критическую область, задаваемую леммой Неймана-Пирсона, можно определить в терминах *p-value* (Neyman, Pearson, 1933). Какая гипотеза наиболее правдоподобна: для которой полученное значение *p-value* = 0.01 или для которой *p-value* = 0.05? Ответа на этот вопрос не существует, так как величина *p-value* привязана к выборке, и, тем самым, обладает свойством случайности. Поэтому сравнение выдвигаемых гипотез на основе величины *p-value* некорректно. В такой постановке задачи меньшее значение *p-value* указывает лишь на то, что исследуемая гипотеза с меньшей вероятностью вызвана простой случайностью выборочных данных. Более того, служит заблуждением тот факт, что вероятность *p-value* сохранится при повторном эксперименте.

Опишем еще одну трудность, возникающую при проверке гипотез с использованием сравнения уровней значимости или при его выборе. Действительно ли гипотеза, принятая на уровне значимости 0.01, более вероятна, чем принятая на уровне значимости 0.05? Конечно, ответ отрицателен; и для такого ответа есть две причины. Первая причина связана, в первую очередь, с аналитическими исследованиями: если процесс рассматривается в долгосрочной перспективе, то он может меняться (как было отмечено выше), и более вероятной может быть не та гипотеза, что была принята первоначально. Вто-

рая причина связана с известным фактом из общего курса математической статистики: меньший уровень значимости (вероятность ошибки I рода) вызывает, как правило, симметричное увеличение вероятности ошибки II рода. Опишем этот факт подробнее: если мы отвергаем  $H_0$ , мы можем отвергнуть ее и в том случае, когда она истинна; если мы принимаем  $H_0$ , мы можем принять ее и в том случае, когда она ложна. Эти два источника ошибок редко можно полностью устранить. Этот факт ясно демонстрирует иллюстрация на рис. 2 при проверке гипотезы  $H_0: M(X) = m_0$  против альтернативной  $H_1: M(X) = m_1$ . Таким образом, с уменьшением уровня значимости, возникает ловушка, связанная с увеличением вероятности не принять верную альтернативную гипотезу  $H_1$  (рис. 2). В некоторых практических случаях важнее избежать первого типа ошибок, а в других – второго. Известна историческая проблема, рассмотренная Лапласом – что серьезнее: осудить невиновного или оправдать виновного? (Neyman, Pearson, 1933). Ответ на этот вопрос будет зависеть от последствий каждого типа ошибок: будет ли наказание в виде смертной казни или штрафа; какова опасность для общества освобожденных преступников и т.п.?

Более того, если будет выбран уровень значимости слишком маленький (почти ноль), то наш используемый статистический критерий будет «статься» по всем выборкам принимать основную гипотезу  $H_0$ .



**Рисунок 2.** Геометрическая интерпретация вероятностей ошибок I рода ( $\alpha$ ) и II рода ( $\beta$ ) при проверке гипотезы  $H_0: M(X) = m_0$  против альтернативной гипотезы  $H_1: M(X) = m_1$

**Figure 2.** Geometric interpretation of the probabilities of errors of the first kind ( $\alpha$ ) and second kind ( $\beta$ ) when testing the hypothesis  $H_0: M(X) = m_0$  against the alternative hypothesis  $H_1: M(X) = m_1$

Какой выход из такой ситуации? Во-первых, математическая статистика в таких случаях может лишь показать, как контролировать и минимизировать риск ошибок, а вот как именно следует установить баланс между ошибками I и II рода, должен определить исследователь, отталкиваясь от знания ситуации (Fisher, 1925; Neyman, Pearson, 1933). Во-вторых, необходимо верифицировать каждый возможный раз дополнительными опытами результат, чтобы дать фактам возможность проверить начальную гипотезу, и при этом учитывать опыт предшествующих исследований (Fisher, 1935; Шпер, 2021). Также, если есть несколько критериев проверки гипотезы  $H_0$ , то выбирается тот, который при заданном уровне значимости минимизирует вероятность ошибки II рода, т.е. задает минимальную вероятность принятия  $H_0$ , когда истинной гипотезой является  $H_1$  (т.е. более мощный критерий). И, самое важное, следует признать ограниченность полученных результатов, принять существова-

ние вариабельности всех процессов и отказаться от принятия решений вида «истина – ложь», основанных на каких-либо произвольных пороговых значениях (Шпер, 2021).

### ***Подведем итоги:***

Сходство использования показателей уровня значимости и *p-value* обусловлено леммой Неймана-Пирсона, однако, алгоритм принятия решений на основе этих двух характеристик различается: *p-value* предполагает получение выводов о единичном эксперименте из бесконечной генеральной совокупности (соответственно, *p-value* нельзя рассматривать как вероятность того, что основная гипотеза не верна), а работа с уровнем значимости предполагает следование правилам проверки гипотез.

Вопрос о том, какой из двух гипотез больше доверять на основе полученных значений *p-value* (или выбранных уровней значимости), не корректен с точки зрения подхода проверки гипотез.

## **Заключение**

В работе представлено исследование двух важных вопросов, возникающих при проверке статистических гипотез: выбор уровня значимости и различие в проверке с помощью уровня значимости и с использованием величины *p-value*. Продемонстрировано на примерах, что выбор уровня значимости при проверке статистических гипотез лежит на плечах исследователя, имеет внестатистические обоснования и зависит от типа исследования. Показано, что алгоритмы принятия решений на основе *p-value* и уровня значимости различаются.

В ходе исследования также обсуждаются заблуждения, с которыми сталкиваются исследователи в прикладных областях при статистической проверке научных результатов:

- *p-value* или уровень значимости  $\alpha$  – это вероятность того, что нулевая гипотеза не верна;
- маленькое значение *p-value* или уровня значимости  $\alpha$  доказывает истинность принятой нулевой гипотезы,
- $(1 - p-value)$  или  $(1 - \alpha)$  – это вероятность того, что альтернативная гипотеза верна;
- высокие значения  $(1 - p-value)$  или  $(1 - \alpha)$  – это вероятность того, что результаты сохранятся при повторении эксперимента,
- $\alpha$  – это вероятность того, что результат был обусловлен ошибкой выборки.

В работе продемонстрировано, что все вышенаписанные заключения ложны.

Самый важный вывод, который следует из исследования: ошибочным следует признать представление о том, что одно число (*p-value* или уровень значимости) может отражать как долгосрочные результаты эксперимента, так и доказательство отдельного результата по выборке.

Никакие значения *p-value* и уровня значимости не проверяют и не оценивают вероятность истинности или ложности гипотезы. Согласие или несогла-

ние опытных данных с нулевой гипотезой никак не влияет на ее истинность или ложность (основная гипотеза изначально истинна или ложна, но, как правило, это исследователю не известно). Поэтому никакие однозначные выводы по результатам расчета  $p$ -value делать нельзя. Для обеспечения надежности выводов необходимо проводить верификацию результатов каждый раз дополнительными опытами и учитывать результаты предшествующих исследований, понимать рамки ограничений своих научных исследований и выводов, и принимать во внимание вариабельность всех процессов.

## Литература

- Адлер, Ю. П. (2020) Зачем нужны выборки? *Контроль качества продукции*, № 8, с. 46-49.
- Кухта, А.Е., Максимова, О.В. (2022) Воздействие климатических факторов вегетационного периода на приросты сосны обыкновенной в Среднем Поволжье и на побережье Белого моря, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 72-83, doi 10.52002/0130-2906-2022-1-72-83.
- Кухта, А.Е., Максимова, О.В., Махрова, Т.Г., Громов, С.А. (2024) Отклик приростов сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* бореальных фитоценозов на трансграничное загрязнение, *Проблемы региональной экологии*, № 6, с. 26-34, doi 10.24412/1728-323X-2024-2-26-34.
- Максимова, О.В. (2025) Сравнение временных рядов в прикладных исследованиях: близость, синхронность и корреляция, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, № 1-2, с. 46-64, doi 10.24412/ 2782-3237-2025-1-2-46-64.
- Шейнин, О.Б. (2008) *Статьи по истории теории вероятностей и статистики*, Берлин: NG Verlag, 258 с.
- Шпер, В.Л. (2021) Что такое р-значение, и почему вокруг него столько шума? *Контроль качества продукции*, №3, с. 37-43.
- Amrhein, V., Greenland, S., McShane, B. (2019) Scientists rise up against statistical significance, *Nature*, no. 567, pp. 305-307, doi: 10.1038/d41586-019-00857-9.
- Fisher, R.A. (1925) *Statistical Methods for Research Workers*, Edinburgh, UK: Oliver and Boyd.
- Fisher, R.A. (1935) *The Design of Experiments* (9th ed.), Macmillan, 250 p.
- Fisher, R.A. (1956) *Statistical Methods and Scientific Inference*, New York, Hafner Press, 175 p.
- Goodman, S.N. (1999) Toward Evidence-Based Medical Statistics. The P value fallacy, *Annals of Internal Medicine*, no. 130(12), p. 995, doi 10.7326/0003-4819-130-12-199906150-00008.
- Klimont, Z., Hoglund-Isaksson, L., Heyes, C., Rafaj, P., Schopp, W., Cofala, J., Purohit, P., Borken-Kleefeld, J., Kupiainen, K., Kiesewetter, G., Winiwarter, W.,

Amann, M., Zhao, B., Wang, S., Bertok, I., and Sander, R. (2017) *Global scenarios of air pollutants and methane, 1990-2050*, ACP.

Neyman, J, Pearson, E. (1933) On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses, *Philos Trans R Soc Lond A.*, no. 231, pp. 289-337, doi: 10.1098/rsta.1933.0009.

Pearson, E.S., Plackett, R.L., Barnard, G.A. (1990) *A Statistical Biography of William Sealy Gosset*, New York, Clarendon Press, 150 p.

Rummel, R.J. (1976) *Understanding Correlation*, Honolulu, Hawaii, Department of Political Science, University of Hawai'i.

Wasserstein, R.L., Lazar, N.A. (2016) The ASA Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose, *The American Statistician*, no. 70(2), pp. 129-133, doi 10.1080/00031305.2016.1154108.

## Reference

Adler, Yu. P. (2020) Zachem nuzhny vyborki? [Why Samples Are Needed? Product Quality Control], *Kontrol' kachestva produktsii*, 8, pp. 46-49.

Kukhta, A.Ye., Maksimova, O.V. (2022) Vozdeystviye klimaticheskikh faktorov vegetatsionnogo perioda na prirosty sosny obyknovennoy v Srednem Povolzh'ye i na poberezh'ye Belogo moray [he Impact of Climatic Factors of the Growing Season on Scots Pine Growth in the Middle Volga Region and on the White Sea Coast], *Meteorology and Hydrology*, 1, pp. 72-83.

Kukhta, A.Ye., Maksimova, O.V., Makhrova, T.G., Gromov, S.A. (2024) Otklik prirostov sosny obyknovennoy Pinus sylvestris boreal'nykh fitotsenozov na transgranichnoye zagryazneniye [Response of Scots pine Pinus sylvestris growth in boreal phytocenoses to transboundary pollution], *Problemy regional'noy ekologii*, 6, pp. 26-34.

Maksimova, O.V. (2025) Sravneniye vremennykh ryadov v prikladnykh issledovaniyakh: blizost', sinkhronnost' i korrelyatsiya [Response of Scots pine Pinus sylvestris growth in boreal phytocenoses to transboundary pollution], *Ekologicheskiy monitoring i modelirovaniye ekosistem*, 1-2, pp. 46-64.

Sheynin, O.B. (2008) *Stat'i po istorii teorii veroyatnostey i statistiki* [Articles on the History of Probability Theory and Statistics], Berlin, NG Verlag, 258 p.

Shper, V.L. (2021) Chto takoye p-znachenije, i pochemu vokrug nego stol'ko shuma? [What is a p-value, and why is there so much fuss about it?], *Kontrol' kachestva produktsii*, 3, pp. 37-43

Amrhein, V., Greenland, S., McShane, B. (2019) Scientists rise up against statistical significance, *Nature*, no. 567, pp. 305-307, doi: 10.1038/d41586-019-00857-9.

Fisher, R.A. (1925) *Statistical Methods for Research Workers*, Edinburgh, UK: Oliver and Boyd.

Fisher, R.A. (1935) *The Design of Experiments* (9th ed.), Macmillan, 250 p.

Fisher, R.A. (1956) *Statistical Methods and Scientific Inference*, New York, Hafner Press, 175 p.

Goodman, S.N. (1999) Toward Evidence-Based Medical Statistics. 1. The P value fallacy, *Annals of Internal Medicine*, no. 130(12), p. 995, doi 10.7326/0003-4819-130-12-199906150-00008.

Klimont, Z., Hoglund-Isaksson, L., Heyes, C., Rafaj, P., Schopp, W., Cofala, J., Purohit, P., Borken-Kleefeld, J., Kupiainen, K., Kieseewetter, G., Winiwarter, W., Amann, M., Zhao, B., Wang, S., Bertok, I., and Sander, R. (2017) *Global scenarios of air pollutants and methane 1990-2050*, ACP.

Neyman, J, Pearson, E. (1933) On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses, *Philos Trans R Soc Lond A.*, no. 231, pp. 289-337, doi 10.1098/rsta.1933.0009.

Pearson, E.S., Plackett, R.L., Barnard, G.A. (1990) *Student. A Statistical Biography of William Sealy Gosset*, New York, Clarendon Press, 150 p.

Rummel, R.J. (1976) *Understanding Correlation*, Honolulu, Hawaii, Department of Political Science, University of Hawai'i.

Wasserstein, R.L., Lazar, N.A. (2016) The ASA Statement on p-Values, Context, Process, and Purpose, *The American Statistician*, no. 70(2), pp. 129-133, doi 10.1080/00031305.2016.1154108.

*Статья поступила в редакцию (Received): 31.10.2026.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 07.11.2026.*

### **Для цитирования / For citation:**

Максимова, О.В., Шпер, В.Л. (2026) Проблемы принятия решений на основе P-VALUE и уровня значимости в прикладных исследованиях, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 9-20, doi: 10.21513/0207-2564-2026-1-2-9-20.

Maksimova, O.V., Shper, V.L. (2026) Decision making problems based on p-value and significance level in applied research, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 9-20, doi: 10.21513/0207-2564-2026-1-2-9-20.

## Обзор среднего состава газа угольных пластов по странам и макрорегионам

*Н.В. Попов<sup>1)</sup>, А.А. Миронов<sup>2)</sup>, А.К. Сингх<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup>Институт глобального климата и экологии,  
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б,

<sup>2)</sup>Автономная некоммерческая организация «Международный центр устойчивого энергетического развития под эгидой ЮНЕСКО»,  
РФ, 117292, г. Москва, ул. Кедрова, д. 8, к. 2

<sup>3)</sup>Индийский технологический институт в Мумбаи (ИТ Bombay),  
Мумбаи, Индия

\*Адрес для переписки: [nikitappv@igce.ru](mailto:nikitappv@igce.ru)

**Реферат.** К 2027 году МГЭИК планирует разработать Методический доклад по инвентаризации короткоживущих климатически активных веществ, не являющихся парниковыми газами (летучие не метановые органические соединения, черный углерод). Ожидается, что данное руководство будет служить методической основой для учёта таких веществ в национальных инвентаризациях, а также будет содержать рекомендуемые коэффициенты для расчета их выбросов в различных отраслях производственной деятельности человека, включая угледобывающую отрасль. В настоящее время разработка методических руководств осуществляется ведущими авторами разделов – экспертами, приглашёнными МГЭИК из разных стран, в том числе из России.

В этой связи была сформирована и систематизирована база данных по компонентному составу газов угольных пластов крупнейших месторождений мира. В результате обработки открытых научных и отраслевых источников были получены усреднённые составы газов угольных пластов по странам и макрорегионам мира в трёх интервалах глубин, рекомендуемых МГЭИК.

Средняя объемная доля метана в газе угольных пластов преимущественно находится в интервале 52-95%. Максимальные средние содержания других компонентов составили: этана ( $C_2H_6$ ) – 4.55%, пропилена ( $C_3H_6$ ) – 1.8%, пропана ( $C_3H_8$ ) – 1.9%, бутана ( $C_4H_{10}$ ) – 0.48% и водорода ( $H_2$ ) – 0.63%. Суммарная фракция неметановых летучих органических соединений (НМЛОС) – 2.53%. Сероводород ( $H_2S$ ) в результатах рассмотренных открытых публикаций не обнаружен, а анализ оксида углерода (CO) не проводился ввиду его единичного присутствия.

Анализ зависимости состава газа от глубины показал, что концентрация метана в целом возрастает с глубиной, достигая максимальных значений в интервале 750-1500 м, после чего наблюдается её нелинейное снижение. Содержание НМЛОС демонстрирует экспоненциальный рост с глубиной с усилением тренда на глубинах более 1000 м. В целом наибольшие концентрации углеводородных компонентов фиксируются в интервале глубин 1000-

1500 м, тогда как на больших глубинах для отдельных компонентов наблюдаются разнонаправленные зависимости. Сформированная база данных может служить основой для дальнейших расчётов коэффициентов выбросов короткоживущих климатически активных веществ при добыче угля. Полученные результаты представляют практическую значимость для дальнейшей разработки методических подходов МГЭИК и могут быть использованы при подготовке международных руководств по инвентаризации выбросов в угольной промышленности.

**Ключевые слова.** Газ угольных пластов, состав, НМЛЮС, метан, Китай, метан угольных пластов, короткоживущие климатически активные вещества.

## Overview of the average coal seam gas composition by country and region

*N.V. Popov<sup>1)</sup>, A.A. Mironov<sup>2)</sup>, A.K. Singh<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup>Yu. A. Israel Institute of Global Climate and Ecology,  
20B, Glebovskaya st., 107258, Moscow, Russian Federation

<sup>2)</sup>Autonomous Non-Commercial Organization “International Sustainable Energy Development  
Centre” under the auspices of UNESCO,  
3rd floor, build. 2, 8, Kedrova str., 117292, Moscow, Russian Federation

<sup>3)</sup>Indian Technology Institute in Bombay (IIT Bombay),  
Bombay, India

\*Correspondence address: [nikitappv@igce.ru](mailto:nikitappv@igce.ru)

**Abstract.** By 2027, the IPCC plans to develop a Methodological Report on the inventory of short-lived climate forcers that are not greenhouse gases (non-methane volatile organic compounds and black carbon). This guidance is expected to provide a methodological basis for accounting for these substances in national inventories and to include recommended emission factors for their estimation across various sectors of human activity, including the coal mining industry. The development of these methodological guidelines is currently being carried out by lead authors – experts invited by the IPCC from different countries, including Russia.

In this context, a database on the compositional characteristics of coal seam gases from major coal deposits worldwide was compiled and systematized. Based on the analysis of open scientific and industry sources, average coal seam gas compositions were derived for individual countries and global regions across three depth intervals recommended by the IPCC.

The average methane content in coal seam gas predominantly ranges from 52% to 95%. The maximum average concentrations of other components were 4.55% for ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), 1.8% for propylene (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), 1.9% for propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), 0.48% for butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), and 0.63% for hydrogen (H<sub>2</sub>). Summary NMVOC – 2.53%. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) was not detected in the reviewed open-source publications, and carbon monoxide (CO) was not analyzed due to its limited occurrence.

---

The relationship between gas composition and depth was evaluated for CH<sub>4</sub>, NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds), and H<sub>2</sub>. The results indicate that methane concentration generally increases with depth, reaching maximum values within the 750-1500 m interval, followed by a nonlinear decrease at greater depths. In contrast, NMVOC content exhibits an exponential increase with depth, with a steeper trend observed beyond 1000 m. Overall, the highest concentrations of hydrocarbon components are observed at depths of 1000-1500 m, while deeper intervals show divergent trends among individual components.

The compiled database can serve as a basis for further estimation of emission factors for short-lived climate forcers from coal mining. The results have practical significance for the further development of IPCC methodological approaches and can be used in the preparation of international guidelines for emission inventory in the coal mining sector.

**Keywords.** Coalbed gas, composition, NMVOC, methane, China, coalbed methane, short-lived climate forcers.

## Введение

Короткоживущие климатически-активные вещества (КЖКАВ) – это перечень химически активных компонентов, срок жизни которых в атмосфере обычно составляет не более двадцати лет. Данные вещества различаются по физико-химическим свойствам и воздействию на окружающую среду. КЖКАВ могут напрямую воздействовать на климатическую систему через радиационный форсинг или косвенно, так как они, вступая в реакции с другими атмосферными составляющими могут приводит к образованию парниковых газов.

Согласно данным Шестого Оценочного Доклада МГЭИК (ОД6) (IPCC, 2023) к прямым КЖКАВ относятся: метан (CH<sub>4</sub>); озон (O<sub>3</sub>); короткоживущие галогены; гидрофторуглероды (HFCs); гидрохлорфторуглероды (HCFCs) и аэрозоли. К косвенным КЖКАВ относят оксиды азота (NO<sub>x</sub>), углерода оксид (CO), не метановые летучие органические соединения (НМЛОС), диоксид серы (SO<sub>2</sub>), аммиак (NH<sub>3</sub>) и аэрозоли, включая углеродсодержащие. С точки зрения воздействия на климатическую систему КЖКАВ могут приводить как к охлаждающему эффекту, например, SO<sub>2</sub>, так и к потеплению, как чёрный углерод (BC). Согласно ОД6 можно с большой долей уверенности предполагать, что сокращение годовых выбросов КЖКАВ за период от 10-20 лет может иметь столь же значительное воздействие на климатическую систему, как и годовые выбросы диоксида углерода (CO<sub>2</sub>).

На 62-й конференции МГЭИК в Болгарии было принято решение IPCC-LXI-7 о подготовке Методического доклада МГЭИК по оценке выбросов КЖКАВ. Цель доклада – разработка методологии инвентаризации КЖКАВ, которая может быть применена на национальном уровне каждой страной. Охват веществ, учитываемые Методическим докладом, будет меньше, чем перечень КЖКАВ, представленный в ОД6, а именно: NO<sub>x</sub>, CO, НМЛОС, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, BC и органический углерод (OC).

---

Структура Методического доклада будет охватывать те же сектора, что Руководящие принципы МГЭИК 2006 года (IPCC, 2006) и Уточнения к ним 2019 года (IPCC, 2019): энергетика; промышленность; сельское хозяйство; землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство (ЗИЗЛХ) и отходы.

Сектор Энергетика будет охватывать выбросы от стационарного сжигания с целью производства тепла и электроэнергии, мобильного сжигания в транспорте и летучие, или фугитивные выбросы. Согласно Руководящим принципам 2006 года летучие выбросы парниковых газов происходят от утечек, продувок и факельного сжигания при операциях с углём, нефтью и газом, а также от трансформации твёрдых видов топлив. Категория летучих выбросов от операций с углём подразделяется на выбросы от подземной добычи, последующего обращения с углём, добытым подземным способом, ликвидированных шахт, факельного сжигания шахтного газа, или газа угольных пластов (далее ГУП), открытой добычи угля, последующего обращения с углём, добытым открытым способом, ликвидированных угольных разрезов, разведки и неконтролируемого горения угля.

Часть выбросов от указанных выше подкатегорий операций с углём связаны с ГУП, содержащимся в углях в сорбированном, свободном и растворённом состояниях. Состав такого газа меняется с глубиной, что связано с наличием явления газовой зональности. В состав ГУП могут входить следующие вещества:  $\text{CH}_4$ , диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), этан и более тяжёлые углеводороды ( $\text{C}_2^+$ ), водород ( $\text{H}_2$ ),  $\text{N}_2$ , инертные газы, например, гелий (He), и другие остаточные элементы.

В научных и отраслевых источниках, посвященных разведочному бурению угольных месторождений, анализу возможности добычи метана из угольных пластов, изучению состава ГУП и других, часто в том или ином виде содержится ценная информация о объемном содержании в ГУП вышеупомянутых КЖКАВ. До сих пор не предпринимались попытки агрегации и анализа этих данных для стран или макрорегионов в целом с точки зрения дальнейшего использования результатов в национальных инвентаризациях выбросов.

Целью данного исследования являлся расчет на основе научных источников среднего состава ГУП для основных угледобывающих стран и макрорегионов мира для различных глубин залегания и анализ полученных результатов.

Для выполнения указанной цели были выполнены следующие задачи:

1. сбор данных о составах ГУП крупнейших угольных месторождений мира;
  2. соотнесение (точное или оценочное) найденных составов с глубиной залегания углей;
  3. расчет среднего состава ГУП для основных угледобывающих стран, для трех диапазонов глубин, рекомендованных МГЭИК: до 200 метров, от 200 до 400 метров и более 400 метров;
  4. расчет средних составов ГУП для указанных глубин для шести макро-регионов мира: Азия, Европа, Северная Америка, Южная Америка, Австралия, и Африка;
-

5. анализ зависимости концентрации отдельных КЖКАВ от глубины залегания угольных пластов.

Методы и материалы

Для целей исследования была составлена выборка стран, которые имеют наибольший объём операционной деятельности по добыче угля в отдельных макрорегионах.

По данным World Statistical Review of Energy 2025 (Energy, 2025) в каждой из частей света, или макрорегионах были выбраны от одной до трех стран с наибольшим объёмом добычи угля в 2024 году: в Азии – Китай, Индия и Индонезия; в Европе – Российская Федерация, Германия и Польша; в Северной Америке – США и Канада; в Южной Америке – Колумбия; в Австралии и Океании – Австралия; в Африке – ЮАР. Данные по добыче угля в этих странах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистика по добыче угля по странам и макрорегионам в 2024 году (Statistical Review, 2025)

Table 1. Coal production statistics by countries and regions in 2024 (Statistical Review, 2025)

| Страна               | Добыча угля за 2024 г., млн т | Добыча угля всего в макро-регионе за 2024 г., млн т |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Азия                 |                               |                                                     |
| Китай                | 4780                          | 7417.1                                              |
| Индия                | 1085.1                        |                                                     |
| Индонезия            | 836.3                         |                                                     |
| Европа               |                               |                                                     |
| Российская Федерация | 427.2                         | 757.1 <sup>1</sup>                                  |
| Германия             | 91.9                          |                                                     |
| Польша               | 85.2                          |                                                     |
| Северная Америка     |                               |                                                     |
| США                  | 464.6                         | 512.4                                               |
| Канада               | 42.6                          |                                                     |
| Австралия и Океания  |                               |                                                     |
| Австралия            | 462.9                         | 465.4 <sup>2</sup>                                  |
| Африка               |                               |                                                     |
| ЮАР                  | 235                           | 267                                                 |
| Южная Америка        |                               |                                                     |
| Колумбия             | 52.7                          | 61                                                  |

<sup>1</sup> В докладе (Energy, 2025) Турция относится к странам Европы, а Россия отнесена к содружеству CIS, но в рамках данной статьи разделение было выполнено по географической принадлежности: Россия отнесена к Европе, а Турция не вошла в список стран-лидеров по добыче угля в Азии

<sup>2</sup> Указана сумма добычи угля в Австралии и Новой Зеландии согласно докладу (Statistical Review, 2025)

По каждой из стран выборки проводился поиск открытых исследований, содержащих данные по составу ГУП, отобранных на определенных глубинах. Полученные данные заносились в таблицу, где были указаны угольный бассейн (название шахты или месторождения), молярные доли компонентов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2^+$  и др.) и глубина отбора проб.

Для каждой страны и диапазона глубин далее рассчитывалось среднее объемное содержание каждого компонента в ГУП. В случае наличия большого объема данных для различных проб (скважин) из одного бассейна, усреднение сначала проводилось по пробам внутри бассейна, а затем между бассейнами внутри страны. Данные по странам усреднялись для получения значения по макрорегиону. Если для определенного макрорегиона отсутствовали данные по компонентному составу ГУП для некоторого диапазона глубин, то они усреднялись по всем остальным макрорегионам, с целью получения среднего глобального компонентного состава ГУП.

По результатам проведенного обзора литературы, в общей сложности данные 40 научных источников легли в основу расчета средних значений состава ГУП для стран и макрорегионов.

### *Макрорегион Азия*

Для макрорегиона Азия расчет базируется на данных 12 источников, включая 7 публикаций для Китая (Haitao et al., 2022; Wei et al., 2022; Wei et al., 2024; Zhang et al., 2021; Li et al., 2021; Lu et al., 2022; Xia et al., 2016), 2 для Индии и 4 для Индонезии (Simatupang, Amarullah, 2010; Moore et al., 2014; Harfiandri et al., 2022; Mazumder et al., 2010).

Географический охват в Китае включает данные по крупнейшим угледобывающим регионам: Внутренней Монголии (бассейн Эрлянью) (Haitao et al., 2022), провинциям Шаньси (бассейн Ордос) (Xia et al., 2016), Синцзянь (Джунгарский бассейн) (Zhang et al., 2021; Li et al., 2021), Гуйчжоу (угленосные районы Южного Сычуаня и северного Гуичжоу) (Lu et al., 2022), а также провинции Аньхой (угленосные регионы Хайнань и Хуабей) (Wei et al., 2024; Wei et al., 2022).

Глубины, охватываемые собранными данными: от 354 до 3820 м. В ряде исследований проводится анализ генезиса и механизмов накопления ГУП в пластах, а в остальных публикациях проводится комплексный анализ геохимических характеристик и ресурсов ГУП в пластах вместе с параметрами, влияющими на них.

По Индии собраны данные по Гондванским отложениям по Дамодарскому угольному бассейну (Shukla et al., 2025) и бассейну Сон-Маханади. Охватываемые глубины: от 114 до 2321 м., что говорит о том, что полученные данные могут также отражать состав ГУП, выделяющийся при открытой добыче угля. В исследовании (Shukla et al., 2025) проводится оценка петрографических, геохимических и характеристик минеральной матрицы проб сланца и углей различных месторождений раннепермских Гондванских образований. Данные из конфиденциального источника содержат только данные о составе ГУП.

---

По Индонезии данные охватывают угольные бассейны Кутай, Барито и Южная Суматра. Глубины меньше, чем у остальных азиатских стран – от 235 до 921 метров. В двух исследованиях проводится оценка ресурсов ГУП в бассейнах Кутай и Южная Суматра (Simatupang, Amarullah, 2010; Harfiandri et al., 2022), целью других работ является оценка подверженности состава ГУП температуре (Moore et al., 2014), и анализ возможности захоронения CO<sub>2</sub> в угольных пластах (Mazumder et al., 2010).

Таким образом, в макрорегионе Азия охвачены крупнейшие угледобывающие районы трёх стран: в Китае – бассейны Эрлянь, Ордос, Джунгар и угленосные районы Южного Сычуаня и Северного Гуйчжоу; в Индии – Дамодар и Сон-Маханади; в Индонезии – Кутай, Барито, и Южная Суматра, что говорит о представительности этих данных для оценки средних составов ГУП разных глубин азиатского макрорегиона.

### ***Макрорегион Европа***

Обзор составов ГУП в Европейском макрорегионе базируется на 10 источниках литературы: 5 по Российской Федерации; 2 по Германии и 3 по Польше.

Крупнейшим производителем угля в Европе является Российская Федерация. Основу для расчета составляют данные из работ (Тендер, 1981; Зимков, 1966), посвященные исследованию составов шахтного метана в Кузнецком и Печорском угольных бассейнах, на которые суммарно приходится порядка 80% всей добычи угля в стране (НДК, 2025). Из работы (Журавлева и др., 2015) были взяты средние значения результатов компонентного анализа проб с Нарыкско-Осташкинской площади и Талдинского месторождения Кузбасса. Расчетная база дополнена независимыми данными из работы (Журавлева, Потокина, 2012) и исследований по Печорскому бассейну (Потокина, 2015). Диапазон глубин, охватываемых данными, составляет от 250 до 1500 м, что свидетельствует о том, что полученные данные могут быть репрезентативны для состава ГУП, выделяющегося при открытой добыче угля.

Данные, полученные по Германии, охватывают каменноугольные бассейны рек Рура, Саара, Ахена и Иббенбюрена. Диапазон охватываемых глубин составил 300-1500 м. Первый источник является конфиденциальным и содержит данные о составе ГУП всех четырех вышеупомянутых бассейнов, во втором источнике (Thielemann et al., 2004) проводится оценка ресурсов и анализ генезиса ГУП в Рурском бассейне.

Основная добыча угля в Польше сосредоточена в Верхнесилезском и Люблинском угольных бассейнах (Kotarba, 2011), для которых приведены данные по составу угольного газа, отобранного из шахт и дегазационных скважин угольных пластов. В исследовании польской угольной компании JSW (Jastrzębska Spółka Węglowa) по Верхнесилезскому бассейну (Badyłak, 2021) представлены результаты утилизации ГУП, дренированного на шахтах компании. В работе (Badyda, 2008) приведен обзор проблем, связанных с энергетическим использованием ГУП и связанными техническими экологическими и экономическими эффектами. Также, в работе (Badyda, 2008) проводится оценка

свойств ГУП и состояние его утилизации в Польше и в мире на фоне признанных источников возобновляемой энергии и приводятся обобщённые данные по составу ГУП в польских угольных бассейнах, основанные на эксплуатационных и статистических материалах (в том числе данных горного надзора).

Из вышесказанного следует, что проведенный обзор литературы по Европейскому макрорегиону охватывает его основные угольные бассейны: в России – Печорский бассейн и Кузнецкий; в Германии – бассейны рек Рура, Саара, Ахена и Иббенбюрена; в Польше – Люблинский и Верхнесилезский. Полученные данные позволяют отразить средний состав ГУП, выделяющийся при добыче угля на разных глубинах в Европейском макрорегионе.

### ***Макрорегион Северная Америка***

В Северной Америке крупнейшим производителем угля является США. На основе обзора 4 источников литературы были отобраны данные по угольным бассейнам Паудер-Ривер, Блэк-Уорриор, Сан-Хуан и Центрально-Аппалачскому бассейну. Следует отметить, что США является одной из первых стран мира, в которой была начата промышленная добыча ГУП, в том числе и из законсервированных и ликвидированных угольных шахт (EPA, 2008). В двух исследованиях (Boreck, Weaver, 1984; Lyons, 1996) проводилась оценка характеристик и ресурсов ГУП в бассейнах Паудер-Ривер и Центрально-Аппалачском бассейне, остальные источники (Pashin et al., 2014; Scott, 1994) посвящены оценке гидрологических характеристик бассейна Блэк-Уорриор и анализу характеристик и генезиса ГУП в бассейне Сан-Хуан. Диапазон охватываемых глубин составил от 300 до приблизительно 800 метров.

По Канаде были собраны данные по Западно-канадскому осадочному бассейну, провинции Альберта. В исследовании (Dawson et al., 2000) проведен комплексный анализ территории Канады для разработки ресурсов ГУП: выделены критерии, характеризующие наиболее привлекательные объекты для разведки, сами объекты разведки разделены географически. В исследовании по провинции Альберта (Beaton, 2003) проанализированы несколько районов для разведки ГУП: отмечено, что не все угольные пласты, с большими запасами ГУП потенциально пригодны для разведки этого газа из-за низкой проницаемости пород. Диапазон глубины, на которых отбирались пробы: 330-1413 метров.

Таким образом, обзор литературы по Северно-американскому макрорегиону охватывает основные угольные бассейны, содержащие ГУП: в США – Паудер-Ривер, Блэк-Уорриор, Сан-Хуан и Центрально-Аппалачский бассейн; в Канаде – Западно-канадский бассейн.

### ***Макрорегион Австралия***

Макрорегион представлен данными о типичном составе ГУП крупнейшего угольного бассейна Австралии – Боуэн, штат Квинсленд (KPMG, 2021; Gray et al., 2007), а также данными угленосных толщ Иллавара в пределах Сиднейского бассейна (BHP, 2009) и района Нарраби в пределах угольного бассейна Ганнеда (Heggies, 2009), располагающихся в штате Новый Южный Уэльс.

Для оценки состава ГУП бассейна Боуэн использовались обобщённые (типовые) значения, полученные консалтинговой компанией GHD и опубликованные в технико-экономическом исследовании при участии KPMG (KPMG, 2021). Отмечается, что состав типичен для газа, извлекаемого из ненарушенных угольных пластов, и характерная средняя глубина составляет 400 м. В техническом отчете проекта дегазации и оценке выбросов парниковых газов для угольного пласта Булли (Иллавара) (BNP, 2009) также представлен типичный состав ГУП, указана средняя глубина скважин для исследования – 500 м. В аналогичном отчете для района Нарраби (Heggies, 2009) отмечается преобладание в составе ГУП  $\text{CO}_2$  (до 90%), диапазон глубин составляет 160-180 м (АММ, 2010). Дополнительно по бассейну Боуэн использовались данные научной статьи (Gray et al., 2007), посвященной проекту дегазации выработанного пространства шахты Моранба, диапазон глубин рабочего пласта 125-350 метров.

Таким образом, данные о типичном составе ГУП охватывают крупнейшие угледобывающие бассейны Австралии: Боуэн, Сиднейский, Ганнеда. Общий диапазон рассматриваемых глубин для макрорегиона составил 125-500 метров.

### ***Макрорегион Южная Америка***

Макрорегион характеризуется данными о составе ГУП различных районов Восточных Кордильер, являющимися крупнейшей угленосной провинцией Южной Америки. В статье (Mojica, Marino, 2013) изучены состояние разведки и перспективы добычи метана из угольных пластов департамента Бояка, откуда получены пробы газа. Указано, что угольные пласты с повышенной газоносностью залегают на глубинах более 300 м, однако точная глубина отбора проб не приводится. К примеру, в (El Carbon, 2021) указана глубина изучаемой в (Mojica, Marino, 2013) скважины Tasco (425 м), однако однозначной связи состава ГУП для этой глубины не установлено.

В работе (Duarte-Barrera, Marino-Martinez, 2022) приводятся более детальные данные по району Сезар, а также ссылки на масштабные научно-исследовательские работы, проводившиеся геологической службой Колумбии по районам Бояка, Кудинамарка и Сантандер (Rincón, 2014; Duarte Barrera, 2016; Ortiz Mullet, 2016; Ortiz Mullet, 2018; Duarte Barrera, 2019). В указанных работах приведены составы газа более 111 проб, глубины, охватываемые указанными данными: от 38.9 до 580.9, что позволяет использовать полученную информацию для отображения состава ГУП, выделяющегося при открытой и подземной добыче угля.

Таким образом, данные о составе ГУП макрорегиона относятся преимущественно к угольным отложениям Восточных Кордильер, а диапазон глубин составляет 38.9-580.9 метров.

### ***Макрорегион Африка***

Для макрорегиона Африка использованы данные проекта, посвящённого использованию шахтного метана для выработки электроэнергии на базе топливных элементов (Hauptfleisch, 2010). В качестве площадки был выбран участок

---

компании Anglo Coal по добыче ГУП в районе города Лефалеле (провинция Лимпопо, ЮАР). Данные отнесены к диапазону глубины от 200 до 400 метров.

## Результаты и обсуждение

Национальные усредненные составы газов угольных пластов стран – лидеров по добыче угля в зависимости от глубины представлены в табл. 2.

Наибольшее количество проб в открытых источниках было обнаружено по Китаю – более 230, Колумбии – более 110 и Индии – более 105. Как видно из табл. 2, средняя объемная доля метана в смеси ГУП преимущественно лежит в интервале от 52% до 95%. Максимальная средняя доля этана ( $C_2H_6$ ) составила 4.55%, пропилена ( $C_3H_6$ ) – 1.8%, пропана ( $C_3H_8$ ) – 1.9%, бутана ( $C_4H_{10}$ ) – 0.48%, водорода ( $H_2$ ) – 0.63% НМЛОС (сумма фракций  $C_2$ - $C_6$ ) – 2.53 %.

Следует отметить, что для Северной Америки не были получены данные на глубинах до 200 метров, также и для Африки не имелось данных о компонентном составе ГУП для глубин до 200 и более 400 метров, поэтому отсутствующие данные заменялись средним глобальным составом ГУП для указанных глубин. Из табл. 3 следует, что средние составы ГУП для макрорегионов редко включают в себя тяжелые углеводородные компоненты ( $C_5$ - $C_6$ ).

Была проанализирована зависимость данных по объемной доле  $CH_4$ . НМЛОС и  $H_2$  от глубины в рассматриваемых пробах – результаты приведены на рис. 1, 2 и 4, соответственно. В отличие от табличных данных, включающих усреднённые значения и пробы с оценочными глубинами, графики на рисунках построены только по тем данным, для которых глубина отбора указана точно или приведен диапазон глубин. Анализ по  $CO$  не проводился, так как данный газ был обнаружен всего в трех пробах.  $H_2S$  не был обнаружен в пробах по рассмотренным источникам.

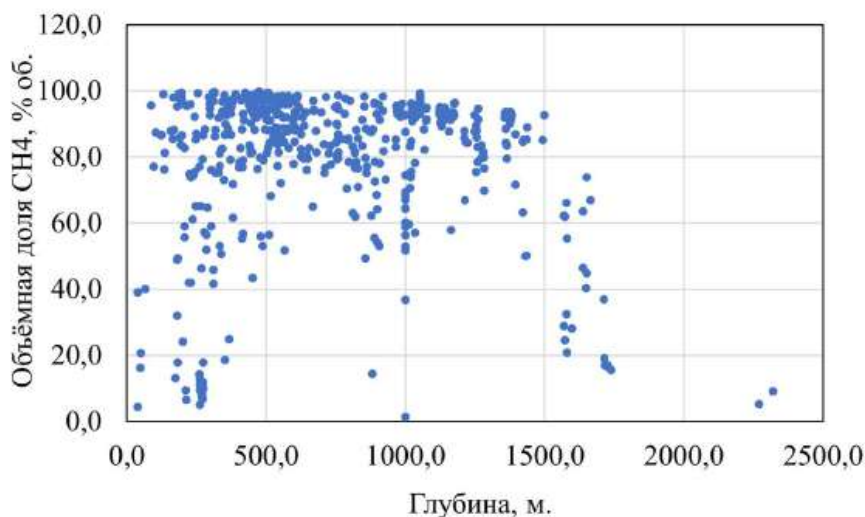


Рисунок 1. Зависимость объемной доли  $CH_4$  в газе угольных пластов от глубины

Figure 1. Dependence of  $CH_4$  volume fraction in coal seam gas on depth

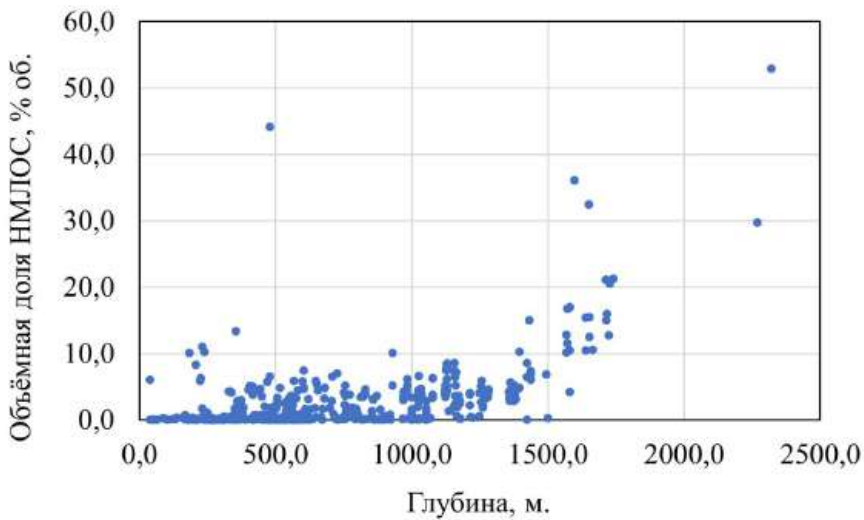
Таблица 2. Национальные усредненные составы газов угольных пластов стран – лидеров по добыче угля, об. %  
Table 2. National average coal seam gas compositions for leading coal-producing countries, vol,%

| Страна       | Глубина, м | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | HMLЮС                | He                   | H <sub>2</sub>       | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub>       | CO                   | H <sub>2</sub> S | Ag                   |
|--------------|------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| Канада       | 200-400    | 95.25           | 0                             | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0                    | 0                    | 0               | 0              | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 88.70           | 0.42                          | 7.4·10 <sup>-2</sup>          | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 7.4·10 <sup>-2</sup> | 0                    | 0                    | 3.23            | 3.82           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| США          | 200-400    | 82.28           | 0.22                          | 0.10                          | 0.12                           | 6.2·10 <sup>-2</sup>           | 0                              | 0                             | 0.28                 | 0                    | 0                    | 6.22            | 0              | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 96.90           | 0.97                          | 1.0·10 <sup>-3</sup>          | 2.0·10 <sup>-4</sup>           | 0                              | 0                              | 0                             | 1.2·10 <sup>-3</sup> | 0                    | 0                    | 1.91            | 0.22           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Россия       | <200       | 95.92           | 0.42                          | 7.1·10 <sup>-2</sup>          | 1.4·10 <sup>-2</sup>           | 2.7·10 <sup>-3</sup>           | 1.0·10 <sup>-3</sup>           | 0                             | 8.9·10 <sup>-2</sup> | 1.2·10 <sup>-2</sup> | 1.0·10 <sup>-3</sup> | 1.71            | 0.94           | 5.0·10 <sup>-3</sup> | 0                    | 0                | 0                    |
|              | 200-400    | 78.69           | 4.55                          | 1.92                          | 0.42                           | 3.8·10 <sup>-4</sup>           | 0                              | 0                             | 2.35                 | 5.6·10 <sup>-4</sup> | 0.34                 | 1.31            | 12.68          | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 88.56           | 3.13                          | 0.91                          | 0.18                           | 1.5·10 <sup>-2</sup>           | 5.8·10 <sup>-4</sup>           | 0                             | 1.11                 | 0                    | 0.27                 | 1.18            | 5.98           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Польша       | 200-400    | 95.20           | 7.0·10 <sup>-3</sup>          | 3.0·10 <sup>-3</sup>          | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 3.0·10 <sup>-3</sup> | 1.0·10 <sup>-2</sup> | 0                    | 0               | 4.80           | 0                    | 0                    | 0                | 4.0·10 <sup>-2</sup> |
|              | >400       | 65.15           | 1.9·10 <sup>-2</sup>          | 1.9·10 <sup>-3</sup>          | 2.8·10 <sup>-4</sup>           | 0                              | 0                              | 0                             | 2.2·10 <sup>-3</sup> | 4.4·10 <sup>-2</sup> | 0                    | 2.07            | 27.72          | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Германия     | 200-400    | 92.50           | 0.25                          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0.63                 | 0.63                 | 3.50            | 2.50           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 83.21           | 1.28                          | 6.4·10 <sup>-2</sup>          | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 6.4·10 <sup>-2</sup> | 0.22                 | 0                    | 5.43            | 9.38           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Китай        | 200-400    | 67.39           | 0.32                          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0                    | 6.7·10 <sup>-2</sup> | 1.46            | 30.89          | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 83.29           | 1.60                          | 0.17                          | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0.17                 | 0                    | 1.5·10 <sup>-3</sup> | 5.33            | 9.33           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Индия        | <200       | 70.50           | 3.03                          | 0.44                          | 0.09                           | 0                              | 0                              | 0                             | 0.53                 | 0                    | 0                    | 3.01            | 9.97           | 8.56                 | 0                    | 0                | 0                    |
|              | 200-400    | 75.64           | 2.40                          | 0.56                          | 0.18                           | 0                              | 0                              | 1.79                          | 2.53                 | 0                    | 0                    | 1.64            | 9.72           | 6.60                 | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 75.51           | 3.69                          | 1.31                          | 0.48                           | 6.2·10 <sup>-2</sup>           | 1.2·10 <sup>-2</sup>           | 0.53                          | 2.39                 | 0                    | 2.5·10 <sup>-3</sup> | 1.37            | 12.04          | 4.57                 | 4.0·10 <sup>-5</sup> | 0                | 0                    |
| Индонезия    | 200-400    | 52.08           | 2.6·10 <sup>-2</sup>          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0                    | 0                    | 2.85            | 38.66          | 6.38                 | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 90.92           | 0.32                          | 4.7·10 <sup>-2</sup>          | 9.2·10 <sup>-3</sup>           | 0                              | 0                              | 0                             | 5.6·10 <sup>-2</sup> | 0                    | 0                    | 8.33            | 0.44           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Южная Африка | <200       | 83.00           | 0                             | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0                    | 0                    | 14.00           | 3.00           | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
| Австралия    | 200-400    | 10.00           | 0                             | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 0                    | 0                    | 90.00           | 0              | 0                    | 0                    | 0                | 0                    |
|              | >400       | 78.01           | 5.0·10 <sup>-3</sup>          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                    | 5.0·10 <sup>-3</sup> | 1.5·10 <sup>-2</sup> | 3.15            | 18.04          | 1.36                 | 0                    | 0                | 0.18                 |
|              | <200       | 86.86           | 1.73                          | 0.55                          | 0.28                           | 0                              | 0                              | 0                             | 0.83                 | 0                    | 0.19                 | 7.76            | 0              | 3.0·10 <sup>-2</sup> | 0                    | 0                | 3.03                 |

**Таблица 3.** Усредненные составы газов угольных пластов по макрорегионам мира в трёх интервалах глубины  
**Table 3.** Average coal seam gas compositions by world major regions across three depth intervals

| Макрорегион         | Глубина, м. | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | НМЛОС                 | He   | H <sub>2</sub>        | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO                    | Ag   |
|---------------------|-------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------------|------|
| Северная Америка    | <200        | 59.44           | 1.12                          | 0.13                          | 0.03                           | 6.72·10 <sup>-4</sup>          | 2.50·10 <sup>-4</sup>          | 0                             | 1.28                  | 0    | 2.50·10 <sup>-4</sup> | 24.29           | 11.19          | 2.14           | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 82.28           | 0.22                          | 0.1                           | 0.12                           | 0.06                           | 0                              | 0                             | 0.5                   | 0    | 0                     | 6.22            | 0              | 0              | 0                     | 0    |
|                     | >400        | 92.8            | 0.69                          | 0.04                          | 1.00·10 <sup>-4</sup>          | 0                              | 0                              | 0                             | 0.73                  | 0    | 0                     | 2.57            | 2.02           | 0              | 0                     | 0    |
| Европа              | <200        | 95.92           | 0.42                          | 0.07                          | 0.01                           | 0                              | 1.00·10 <sup>-3</sup>          | 0                             | 0.51                  | 0.01 | 1.00·10 <sup>-3</sup> | 1.71            | 0.94           | 0.01           | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 88.8            | 1.6                           | 0.64                          | 0.14                           | 1.28·10 <sup>-4</sup>          | 0                              | 0                             | 2.38                  | 0.21 | 0.32                  | 1.6             | 6.66           | 0              | 0                     | 0.01 |
|                     | >400        | 78.97           | 1.48                          | 0.32                          | 0.06                           | 0                              | 1.95·10 <sup>-4</sup>          | 0                             | 1.87                  | 0.09 | 0.09                  | 2.89            | 14.36          | 0              | 0                     | 0    |
| Азия                | <200        | 70.5            | 3.03                          | 0.44                          | 0.09                           | 0                              | 0                              | 0                             | 3.56                  | 0    | 0                     | 3.01            | 9.97           | 8.56           | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 65.04           | 0.92                          | 0.19                          | 0.06                           | 0                              | 0                              | 0.6                           | 1.76                  | 0    | 0.02                  | 1.98            | 26.43          | 4.33           | 0                     | 0    |
|                     | >400        | 83.24           | 1.87                          | 0.51                          | 0.16                           | 0.02                           | 0                              | 0.18                          | 2.74                  | 0    | 0                     | 5.01            | 7.27           | 1.52           | 1.33·10 <sup>-5</sup> | 0    |
| Африка              | <200        | 59.44           | 1.12                          | 0.13                          | 0.03                           | 6.72·10 <sup>-4</sup>          | 2.50·10 <sup>-4</sup>          | 0                             | 1.28                  | 0    | 2.50·10 <sup>-4</sup> | 24.29           | 11.19          | 2.14           | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 83              | 0                             | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                     | 0    | 0                     | 14              | 3              | 0              | 0                     | 0    |
|                     | >400        | 84.88           | 1.28                          | 0.28                          | 0.1                            | 0.01                           | 8.24·10 <sup>-4</sup>          | 0.04                          | 1.71                  | 0.02 | 0.06                  | 3.93            | 6.67           | 0.31           | 2.65·10 <sup>-6</sup> | 0.61 |
| Южная Америка       | <200        | 61.36           | 1.03                          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 1.03                  | 0    | 0                     | 2.43            | 33.84          | 0              | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 78.37           | 0.9                           | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0.9                   | 0    | 0                     | 1.96            | 15.82          | 0              | 0                     | 0    |
|                     | >400        | 82.54           | 0.64                          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0.64                  | 0    | 0                     | 1.42            | 9.68           | 0              | 0                     | 0    |
| Австралия и Океания | <200        | 10              | 0                             | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 0                     | 0    | 0                     | 90              | 0              | 0              | 0                     | 0    |
|                     | 200-400     | 78.01           | 0.01                          | 0                             | 0                              | 0                              | 0                              | 0                             | 5.00·10 <sup>-3</sup> | 0.01 | 0.02                  | 3.15            | 18.04          | 1.36           | 0                     | 0.18 |
|                     | >400        | 86.86           | 1.73                          | 0.55                          | 0.28                           | 0                              | 0                              | 0                             | 2.56                  | 0    | 0.19                  | 7.76            | 0              | 0.03           | 0                     | 3.03 |

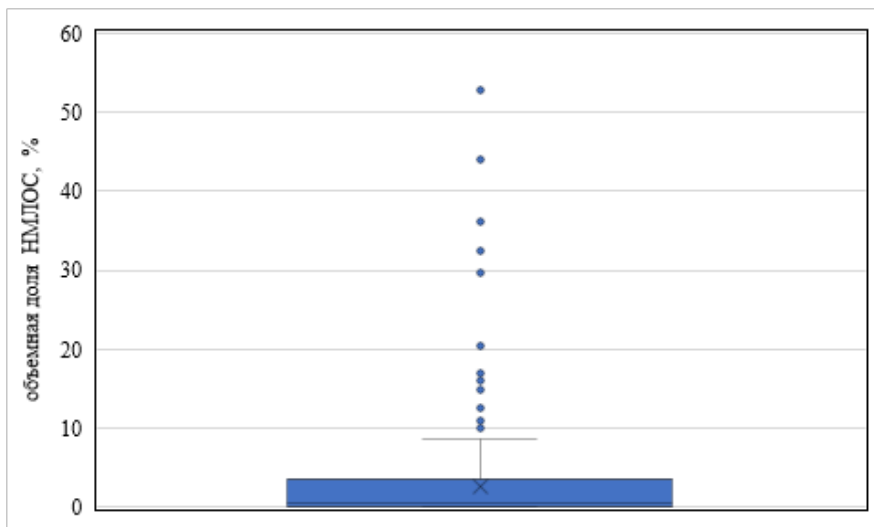
Из рис. 1 следует, что концентрация метана возрастает с глубиной и является максимальной на глубинах 750-1500 метров, за исключением отдельных проб. На глубинах более 1500 метров концентрация этого газа нелинейно убывает.



**Рисунок 2.** Зависимость объемной доли НМЛОС в газе угольных пластов от глубины

**Figure 2.** Dependence of NMLOC volume fraction in coal seam gas on depth

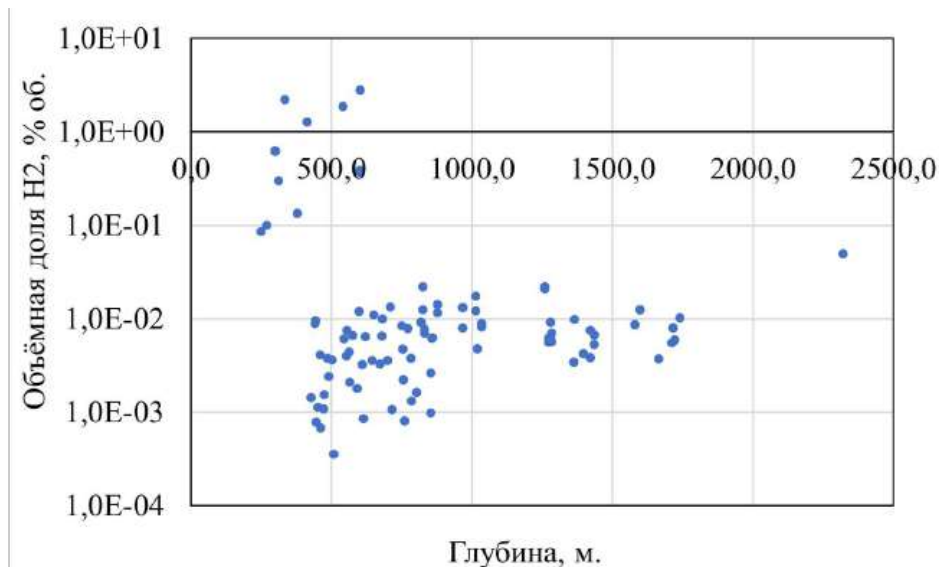
Из рис. 2 следует, что фракция НМЛОС с глубиной экспоненциально возрастает, а на глубинах от 1000 метров ее наклон общего тренда увеличивается. Наибольшие значения фракции НМЛОС соответствуют пробам из Индии, взятым на глубинах 2000-2500 м.



**Рисунок 3.** Распределение объемной доли НМЛОС в полученных данных

**Figure 3.** NMLOC volume fraction distribution in received samples

Из рис. 3 (диаграмма с «усами») видно, что за «усы» выпадают значения фракции НМЛОС больше 10%. Эти данные соответствуют пробам, отобранным в Колумбии (3 пробы), России (4 пробы), Китае (2 пробы) и Индии (23 пробы). Диапазоны глубин, к которым относятся эти пробы: 184-240 м – Колумбия; 354-481 м – Россия; 931 и 1432 м – Китай; 1397-2321 м – Индия. Возможно данное явление связано с наличием локальных зон сверх жирных газов, в которых фракция тяжелых углеводородов может быть значительной. Анализ данных с аномально высоким содержанием НМЛОС составляет предмет дальнейших исследований.



**Рисунок 4.** Зависимость объемной доли  $H_2$  в газе угольных пластов от глубины

**Figure 4.** Dependence of  $H_2$  volume fraction in coal seam gas on depth

Следует отметить, что на рис. 3 ось ординат приведена в логарифмическом масштабе. Можно заключить, что концентрация водорода имеет нелинейную зависимость от глубины, за исключением отдельных 10 проб.

Из рис. 1-4 можно заключить, что в рассмотренной выборке данных наибольших концентраций углеводородные компоненты ГУП достигают на глубинах от 1000 до 1500 метров. После глубины 1500 метров каждый из компонентов имеет разнонаправленные тренды зависимости от глубины.

## Выводы

В работе проведен обзор открытых научных источников, в которых приводятся данные о компонентных составах газа угольных пластов. Данные систематизированы по странам и макрорегионам мира с акцентом на компоненты, относящиеся к короткоживущим климатически активным веществам (загрязнителям), рассчитаны средние по странам и макрорегионам значения объемных долей содержания в газовой смеси  $CH_4$ , НМЛОС и  $H_2$  и других компонентов.

Авторы данного исследования полагают, что использование данных о составах ГУП на разных глубинах вместе с коэффициентами выбросов метана, приведённых в Руководящих принципах МГЭИК 2006 года и Уточнениях к ним 2019 года, могут быть использованы для разработки коэффициентов выбросов некоторых КЖКАВ для разных стран, макрорегионов мира. и средних глобальных коэффициентов выбросов.

Результаты исследования могут быть применены в дальнейшем при разработке методических подходов МГЭИК и подготовке международных рекомендаций по оценке выбросов в угольной отрасли.

### Список литературы

Зимаков, Б.М. (1966) *Газоносность угольных месторождений Печорского бассейна*, дис. ...канд. геол.-минерал. наук, Моск. геол.-развед. ин-т им. С. Орджоникидзе, Москва, 425 с..

Тендер, О.В. (1981) *Геологические условия газоносности угольных пластов северо-восточной части Кузбасса на примере Анжерского и Кемеровского районов*, дис ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.16., Москва, 235 с.

Журавлева, Н.В., Потокина, Р.Р. (2012) Изучение компонентного состава газа, извлеченного из угольного керна, *Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности*, сборник трудов XIV Международной научно–практической конференции (Кемерово, 18-21 сент. 2012 г.), Кемерово, Ин-т угля СО РАН, 279 с.

Журавлева, Н.В., Потокина, Р.Р., Исмагилов, З.Р., Кудинов, Е.В. (2015) Состав газа угольных пластов Талдинского месторождения, *Химия твердого топлива*, № 2, с. 3.

*Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2023 гг. Ч. 1* (2025), Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, Москва, ИГКЭ, 422 с.

Потокина, Р.Р. (2015) *Исследование взаимосвязей сорбции метана углями Печорского угольного бассейна с их физико-химическими свойствами*, специальность 02.00.04 «Физическая химия», автореферат дис. ... канд. хим. наук, Сибирский государственный индустриальный университет, Кемерово, 17 с.

Longwall mining Narrabri (2010) *Australia's Mining Monthly Magazine*, URL: <https://www.miningmonthly.com/international-coal-news/news/1270238/longwall-mining-narrabri> (дата обращения: 10.04.2026).

Badyda, K. (2008) *Możliwości zagospodarowania gazu kopalnianego w Polsce dla celów energetycznych*, Energetyka, Czerwiec, URL: <https://www.cire.pl/pliki/2/zaggazkopx.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Badyłak, A. (2021) *Activities of Jastrzębska Spółka Węglowa S.A. in the context of the upcoming European Commission's methane strategy*, 16th Session of

the Group of Experts on Coal Mine Methane (Geneva, 3-4 March 2021), Geneva UNECE, URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/15.%20SEP%202021%-20%20JSW.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Beaton, A. (2003) Production potential of coalbed methane resources in Alberta, A. Beaton; Alberta Energy and Utilities Board, *EUB/AGS Earth Sciences Report*, vol. 3, URL: [https://static.ags.aer.ca/files/document/ESR/ESR\\_2003\\_03.pdf](https://static.ags.aer.ca/files/document/ESR/ESR_2003_03.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Appin Colliery Area 7 Goaf Gas Drainage Project (2009) *Greenhouse Gas Assessment*. Project no. 109033-02-Report 002 Rev 1. Annex C / BHP Billiton Illawarra Coal. Heggies Pty Ltd., URL: <https://gm3.au/wp-content/uploads/2024/06/annex-c-appin-surface-gas-management-project-ghg-assessment.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Boreck, D., Weaver, J. (1984) Coalbed Methane Study of the “Anderson” Coal Deposit. Johnson County. Wyoming, *A Preliminary Report U. S. Geological Survey*. Open-File Report 84-831, Denver, Colorado, URL: <https://pubs.usgs.gov/of/1984/0831/report.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Dawson, F.M., Marchioni, D.L., Anderson, T.C., McDougall, W.J. (2000) An assessment of coalbed methane exploration projects in Canada, *Geological Survey of Canada*, Bulletin 549, Ottawa, Natural Resources Canada, URL: <https://emrlibrary.gov.yk.ca/gsc/bulletins/549.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Duarte-Barrera, C. (2022) Más allá de los ensayos de desorción en la exploración del gas asociado al carbón (CBM). Caso Colombia, *Ingeniería y Competitividad*, vol. 24, no. 2, doi: 10.25100/iyc.v24i2.11343. URL: [https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/11343](https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11343) (дата обращения: 10.04.2026).

Rincón, M.A., Peña, M.L., Barajas, Q. (2014) Exploración gas metano asociado al carbón. Área Úmbita-Rondón], *Servicio Geológico Colombiano*, (Bogotá), 209 p. URL: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524732/documento/pdf/2105247321101000.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

Duarte Barrera, C.I., F. A., Parra Cristancho, F. A., Ortiz Mullett L. F. (2016) Exploración gas metano asociado al carbón. Área El Carmen de Chucuri. Santander, *Servicio Geológico Colombiano*, (Bogotá), 214 p., URL: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524825/documento/pdf/2105248251101000.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

Ortiz Mulett, L. F., Parra, F. A., Cristancho, C. I., Duarte Barrera (2016) *Exploración gas metano asociado al carbón. Area Landázuri*, Vélez. Departamento de Santander Servicio Geológico Colombiano. (Bogotá), Servicio Geológico Colombiano, 202 p. URL: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=3401201010134706560000000000> (дата обращения: 13.04.2026).

Ortiz Mullet, L.F. , Parra, F. A., Duarte, C. I. (2018) *Exploración de gas metano asociado al carbón. Área Machetá-Jenesano*, Servicio Geológico Colombiano, (Bogotá) Servicio Geológico Colombiano, 179 p. URL: <https://>

miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101046761323000000000 (дата обращения: 13.04.2026).

Duarte Barrera, C.I, Ortiz Mulett, Ortiz Mulett, F. A., Parra Cristancho, F. A. (2019) *Prospección de gas Metano asociado al Carbón*. Área Cucunubá – Guachetá. Cundinamarca, Servicio Geológico Colombiano, (Bogotá) Servicio Geológico Colombiano, 211 p. URL: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx#Default=%7B%22k%22%3A%22k%22%7D#5b6e701c-f4f2-4f6c-91ae-a069d1dfb028=%7B%22k%22%3A%22Guachetá%22%7D> (дата обращения: 13.04.2026).

*Carbón, Geociencias, Geodinámica externa Presentation El Carbon* (2021) URL: <https://ru.scribd.com/document/537292459/CARBON-GEOCIENCIAS-GEODINAMICA-EXTERNA> (дата обращения: 10.04.2026).

*Statistical World Review of Energy 2025* (2025) Energy Institute, London, Energy Institute, 75 p., ISBN 978-1-78725-474-9. .

*Abandoned Coal Mine Methane Opportunities Database* (2008) U.S. Environmental Protection Agency, URL: [https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm\\_opportunities\\_database.pdf](https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm_opportunities_database.pdf) (дата обращения: 13.03.2026).

Gray, A., Aminossadati, S., Stolberg, D. (2007) *Goaf Drainage Design for Moranbah North Mine*, Australian Mining Technology Conference (2-4 Oct. 2007), URL: [https://www.researchgate.net/publication/43478541\\_Goaf\\_drainage\\_design\\_for\\_Moranbah\\_North\\_Mine](https://www.researchgate.net/publication/43478541_Goaf_drainage_design_for_Moranbah_North_Mine) (дата обращения: 12.03.2026).

Harfiandri, M.S., Wioso. Y.B., Rahmanita, D. (2022) *Analysis of the use of methane gas in coal seams in South Sumatera Basin in Muara Enim Formation*, Proceedings of PIT IAGI 51st 2022 (Makassar. South Sulawesi), URL: <https://www.iagi.or.id/web/digital/71/PITIAGI-22-S-Abs-070.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Haitao, L., Tang, Li. S. (2024) Origin and accumulation mechanisms of coalbed methane in low-rank coals in gas-rich sags in the Erlan Basin, *Coal Geology & Exploration*, vol. 52, no. 2, URL: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss2/8> (дата обращения: 13.03.2026).

Hauptfleisch, L. (2010) Fuel Cell Power Generator Project Methane to Markets Expo (New Delhi. India)? URL: [https://www.globalmethane.org/expo-docs/india10/postexpo/coal\\_hauptfleisch.pdf](https://www.globalmethane.org/expo-docs/india10/postexpo/coal_hauptfleisch.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Narrabri Coal Mine (2009) Stage 2 Longwall Project. *Greenhouse Gas Assessment Specialist Consultant Studies Compendium*, vol. 2. no. 8, Heggies Pty Ltd; Narrabri Coal Operations Pty Ltd, URL: <https://whitehavencoal.com.au/Documentations/Narrabri%20Mine/Environmental%20Management.%20Monitoring%20%26%20Compliance/Environmental%20Assessments%20-%20Narrabri%20Stage%202/NAR-%20Stage%202%20EA%20Specialist-Part%208%20-%20Greenhouse%20Gas%20Assessment.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2006) H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, Hayama, IGES, 2006.

*Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2019) E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, Geneva, IPCC, 2019.

Climate Change (2023) *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H. Lee, J. Romero, Geneva, IPCC.

Kotarba, M.J. (2001) Composition and origin of coalbed gases in the Upper Silesian and Lublin basins, *Poland Organic Geochemistry*, vol. 32, no. 1, pp. 163-180.

*Bowen Basin Coal Resources Assessment Report*. Bowen Basin Coal Study Group. KPMG. (Brisbane) Queensland Government (2021) URL: [https://www.resources.qld.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/1592855/bowen-basin-study-final-report.pdf](https://www.resources.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/1592855/bowen-basin-study-final-report.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Li, Y., Yao, C., Yang, S. (2021) Study on origin and accumulation mechanism of coalbed methane in Miquan area of southern margin of Zhunggar Basin *Coal Science and Technology*, vol. 49, no. 4, pp. 220-226, URL: <https://www.mtkxjs.com.cn/en/article/pdf/preview/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.027.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Lu, Z., Tao, Q. Li. (2021) Gas geochemistry and hydrochemical analysis of CBM origin and accumulation in the Tucheng syncline in western Guizhou Province *Geochemical Journal*, vol. 56, pp. 57-73, URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/2/56\\_GJ22005/\\_article/char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/2/56_GJ22005/_article/char/ja/) (дата обращения: 13.03.2026).

Lyons, P. C. (1996) *Coalbed methane potential in the Appalachian states of Pennsylvania, West Virginia, Maryland, Ohio, Virginia, Kentucky and Tennessee an overview* Open-File Report 96-735, Reston, Virginia, URL: <https://pubs.usgs.gov/of/1996/0735/report.pdf> (дата обращения: 16.03.2026).

Mazumder, S.I., Sosrowidjojo, B., Ficarra, A. (2010) *The Late Miocene coalbed methane system in the South Sumatra Basin of Indonesia*, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Queensland, Australia, Brisbane.

Mojica, L., Mariño, J. (2013) Exploration status and coal bed methane (CBM) possibilities in Boyaca (Colombia), *Boletín de Geología*, vol. 35, pp. 31-43, URL: [https://www.researchgate.net/publication/262436438\\_Exploration\\_status\\_and\\_coal\\_bed\\_methane\\_CBM\\_posibilities\\_in\\_Boyaca\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/262436438_Exploration_status_and_coal_bed_methane_CBM_posibilities_in_Boyaca_Colombia) (дата обращения: 10.04.2026).

Moore, T., Bowe, M., Nas, C. (2014) Nas High heat flow effects on a coalbed methane reservoir. East Kalimantan (Borneo), *Indonesia International Journal of Coal Geology*, vol. 131, pp. 7-31, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516214001165> (дата обращения: 13.03.2026).

Pashin, J., McIntyre-Redden, M., Mann, S., Kopaska-Merkel, D. (2014) *Water management strategies for improved coalbed methane production in the*

*Black Warrior Basin, Final Report*, Geological Survey of Alabama, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, URL: <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-02/fe0000888-final-report.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Rincón, M., Duarte, B., Parra, C. (2014) *Exploración gas metano asociado al carbón*. Área Úmbita–Rondón, Servicio Geológico Colombiano, M Bogotá, URL: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524732/documento/pdf/210524732110-1000.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).

Scott, A. (1994) Coalbed gas composition. Upper Cretaceous Fruitland Formation. San Juan Basin. *Colorado and New Mexico Open-File Report OF-94-02* Colorado Geological Survey. Denver Colorado, URL: <https://colorado-geologicalsurvey.org/publications/coalbed-gas-composition-cretaceous-fruitland-san-juan-basin-colorado-new-mexico> (дата обращения: 10.04.2026).

Shukla, P., Mendhe, A., Kamble, D. (2025) Influence of petrographic, geochemical and pore-associated matrix characteristics on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> sorption of coal and shale from Early Permian–Gondwana deposits, India, *ACS Omega*, vol. 10. no. 28, pp. 30060-30086, URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c11499> (дата обращения: 13.03.2026).

Simatupang, D., Amarullah, D. (2010) *Coal bed methane potency of Tanjung Formation in Tanah Bumbu South Kalimantan Buletin Sumber Daya Geologi*, vol. 5, no. 2, pp. 50-57, URL: <https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id/index.php/bsdg/en/article/view/256> (дата обращения: 13.03.2026).

Thielemann, T., Cramer, B., Schippers, A (2004) Coalbed methane in the Ruhr Basin. Germany, a renewable energy resource? *Organic Geochemistry*, vol. 35, no. 11-12, pp. 1537-1549.

Wei, Q., Hu, B., Fang, H. (2022) Composition. origin. and accumulation model of coalbed methane in the Panxie coal mining area, Anhui Province, China *ACS Omega*, vol. 7, no. 21, pp. 17929-17940, doi: 10.1021/acsomega.2c01227, URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01227> (дата обращения: 13.03.2026).

Wei, Q., Chen, S., Yi, W. (2024) Gas content. geochemical characteristics and implications of coalbed methane from the Deep Area of Qi’Nan Coalmine in Huaibei, *Scientific Reports*, vol. 14, Article 28334, URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-79922-x> (дата обращения: 13.03.2026).

Xia, P., Zeng, F., Song, X (2016) Parameters controlling high-yield coalbed methane vertical wells in the B3 area, Xishan coal field, Shanxi, *China Energy Exploration*, vol. 34, no. 5, pp. 711-734, URL: [https://www.researchgate.net/publication/304403689\\_Parameters\\_controlling\\_highyield\\_coalbed\\_methane\\_vertical\\_wells\\_in\\_the\\_B3\\_area\\_Xishan\\_coal\\_field\\_Shanxi\\_China](https://www.researchgate.net/publication/304403689_Parameters_controlling_highyield_coalbed_methane_vertical_wells_in_the_B3_area_Xishan_coal_field_Shanxi_China) (дата обращения: 13.03.2026).

Zhang, B., Deng, Z., Fu, X., Yin, K. (2021) A study on three-phase gas content in coal reservoirs and coalbed methane-water differential distribution in the

western Fukang Mining Area. Xinjiang, *China ACS Omega*, vol. 6, no. 5, pp. 3999-4012, URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c05930> (дата обращения: 13.03.2026).

## References

Zimakov, B.M. (1966) *Gazonosnost' ugol'nykh mestorozhdenij Pechorskogo bassejna* [Pechora basin coal fields gas content], dis. ... kand. geol.-mineral. Nauk, Mosk. geol.-razved. in-t im. S. Ordzhonikidze, Moscow, Russia, 425 p.

Tender, O.V. (1981) *Geologicheskie usloviya gazonosnosti ugol'nykh plastov severo-vostochnoj chasti Kuzbassa na primere Anzherskogo i Kemerovsogo rajonov* [Geological conditions of the gas content of coal seams in the northeastern part of Kuzbass on the example of Angerskiy and Kemerovo regions], dis. ... kand. geol.-mineral. Nauk, Moscow, Russia, 235 p.

Zhuravleva, N.V., Potokina, R.R. (2012) Izuchenie komponentnogo sostava gaza, izvlechnogo iz ugol'nogo kerna [Research of composition of gas extracted from coal core], *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii*. Novye podkhody k razvitiyu ugol'noj promyshlennosti: sbornik trudov XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kemerovo. 18-21 sent. 2012 g.), In-t uglya SO RAN.), Kemerovo, Russia, 279 p.

Zhuravleva, N.V., Potokina, R.R., Ismagilov, Z.R. (2015) Sostav gaza ugol'nykh plastov Taldinskogo mestorozhdeniya [Gas composition of Taldinskoye coal field], *Khimiya tverdogo topliva*, no. 2, p. 3.

*Natsional'nyj doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov. ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990-2023 gg* [National inventory report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol]. Ch. 1, Institut global'nogo klimata i ekologii im. akad. Yu. A. Izraeliya, Moskva, IGKE RAN, 2025, 422 pp.

Potokina, R.R. (2015) *Issledovanie vzaimosvyazej sorbtzii metana uglyami Pechorskogo ugol'nogo bassejna s ikh fiziko-khimicheskimi svojstvami* [A study of the relationship between methane sorption by coals of the Pechora coal basin and their physicochemical properties] Research on relation betwe: spetsial'nost' 02.00.04 «Fizicheskaya khimiya», avtoreferat dis. ... kand. khim. Nauk, Sibirskij gosudarstvennyj industrial'nyj universitet, Kemerovo, Russia, 17 pp.

Longwall mining Narrabri (2010) *Australia's Mining Monthly Magazine*, URL: <https://www.miningmonthly.com/international-coal-news/news/1270238/longwall-mining-narrabri> (дата обращения: 10.04.2026).

Badyda, K. (2008) *Możliwości zagospodarowania gazu kopalnianego w Polsce dla celów energetycznych*, Energetyka, Czerwiec, URL: <https://www.cire.pl/pliki/2/zagazgkorp.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Badylak, A. (2021) *Activities of Jastrzębska Spółka Węglowa S.A. in the context of the upcoming European Commission's methane strategy*, 16th Session of the Group of Experts on Coal Mine Methane (Geneva, 3-4 March 2021), Geneva UNECE, URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/15.%20SEP%202021%-20%20JSW.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Beaton, A. (2003) Production potential of coalbed methane resources in Alberta, A. Beaton; Alberta Energy and Utilities Board, EUB/AGS *Earth Sciences Report*, vol. 3, URL: [https://static.ags.aer.ca/files/document/ESR/ESR\\_2003\\_03.pdf](https://static.ags.aer.ca/files/document/ESR/ESR_2003_03.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Appin Colliery Area 7 Goaf Gas Drainage Project (2009) *Greenhouse Gas Assessment*. Project no. 109033-02-Report 002 Rev 1. Annex C / BHP Billiton Illawarra Coal. Heggies Pty Ltd., URL: <https://gm3.au/wp-content/uploads/2024/06/annex-c-appin-surface-gas-management-project-ghg-assessment.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Boreck, D., Weaver, J. (1984) Coalbed Methane Study of the “Anderson” Coal Deposit. Johnson County. Wyoming, *A Preliminary Report U. S. Geological Survey*. Open-File Report 84-831, Denver, Colorado, URL: <https://pubs.usgs.gov/of/1984/0831/report.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Dawson, F.M., Marchioni, D.L., Anderson, T.C., McDougall, W.J. (2000) An assessment of coalbed methane exploration projects in Canada, *Geological Survey of Canada*, Bulletin 549, Ottawa, Natural Resources Canada, URL: <https://emrlibrary.gov.yk.ca/gsc/bulletins/549.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Duarte-Barrera, C. (2022) Más allá de los ensayos de desorción en la exploración del gas asociado al carbón (CBM). Caso Colombia, *Ingeniería y Competitividad*, vol. 24, no. 2, doi: 10.25100/iyc.v24i2.11343. URL: [https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/11343](https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11343) (дата обращения: 10.04.2026).

Rincón, M.A., Peña, M.L., Barajas, Q. (2014) Exploración gas metano asociado al carbón. Área Úmbita-Rondón], *Servicio Geológico Colombiano*, (Bogotá), 209 p. URL: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524732/documento/pdf/2105247321101000.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

Duarte Barrera, C.I., F. A., Parra Cristancho, F. A., Ortiz Mullett L. F. (2016) Exploración gas metano asociado al carbón. Área El Carmen de Chucuri. Santander, *Servicio Geológico Colombiano*, (Bogotá), 214 p., URL: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524825/documento/pdf/2105248251101000.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

Ortiz Mulett, L. F., Parra, F. A., Cristancho, C. I., Duarte Barrera (2016) *Exploración gas metano asociado al carbón*. Area Landázuri, Vélez. Departamento de Santander Servicio Geológico Colombiano. (Bogotá), Servicio Geológico Colombiano, 202 p. URL: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101013470656000000000> (дата обращения: 13.04.2026).

---

Ortiz Mullet, L.F., Parra, F. A., Duarte, C. I. (2018) *Exploración de gas metano asociado al carbón. Área Machetá-Jenesano*, Servicio Geológico Colombiano, (Bogotá) Servicio Geológico Colombiano, 179 pp. URL: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101046761323000000000> (дата обращения: 13.04.2026).

Duarte Barrera, C.I, Ortiz Mulett, Ortiz Mulett, F. A., Parra Cristancho, F. A. (2019) *Prospección de gas Metano asociado al Carbón. Área Cucunubá – Guachetá*. Cundinamarca, Servicio Geológico Colombiano, (Bogotá) Servicio Geológico Colombiano, 211 p. URL: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx#Default=%7B%22k%22%3A%22k%22%7D#5b6e701c-f4f2-4f6c-91ae-a069d1dfb-028=%7B%22k%22%3A%22Guachetá%22%7D> (дата обращения: 13.04.2026).

*Carbón, Geociencias, Geodinámica externa Presentation El Carbon* (2021) URL: <https://ru.scribd.com/document/537292459/CARBON-GEOCIENCIAS-GEODI-NAMICA-EXTERNA> (дата обращения: 10.04.2026).

*Statistical World Review of Energy 2025* (2025) Energy Institute, London, Energy Institute, 75 p., ISBN 978-1-78725-474-9. .

*Abandoned Coal Mine Methane Opportunities Database* (2008) U.S. Environmental Protection Agency, URL: [https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm\\_opportunities\\_database.pdf](https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/amm_opportunities_database.pdf) (дата обращения: 13.03.2026).

Gray, A., Aminossadati, S., Stolberg, D. (2007) *Goaf Drainage Design for Moranbah North Mine*, Australian Mining Technology Conference (2-4 Oct. 2007), URL: [https://www.researchgate.net/publication/43478541\\_Goaf\\_drainage\\_design\\_for\\_Moranbah\\_North\\_Mine](https://www.researchgate.net/publication/43478541_Goaf_drainage_design_for_Moranbah_North_Mine) (дата обращения: 12.03.2026.).

Harfiandri, M.S., Wioso. Y.B., Rahmanita, D. (2022) *Analysis of the use of methane gas in coal seams in South Sumatera Basin in Muara Enim Formation*, Proceedings of PIT IAGI 51st 2022 (Makassar. South Sulawesi), URL: <https://www.iagi.or.id/web/digital/71/PITIAGI-22-S-Abs-070.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Haitao, L., Tang, Li. S. (2024) Origin and accumulation mechanisms of coalbed methane in low-rank coals in gas-rich sags in the Erlian Basin, *Coal Geology & Exploration*, vol. 52, no. 2, URL: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss2/8> (дата обращения: 13.03.2026).

Hauptfleisch, L. (2010) Fuel Cell Power Generator Project Methane to Markets Expo (New Delhi. India), URL: [https://www.globalmethane.org/expo-docs/india10/postexpo/coal\\_hauptfleisch.pdf](https://www.globalmethane.org/expo-docs/india10/postexpo/coal_hauptfleisch.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Narrabri Coal Mine (2009) Stage 2 Longwall Project. Greenhouse Gas Assessment *Specialist Consultant Studies Compendium*, vol. 2. no. 8, Heggies Pty Ltd; Narrabri Coal Operations Pty Ltd, URL: <https://whitehavencoal.com.au/Documentations/Narrabri%20Mine/Environmental%20Management.%20Monitoring%20%26%20Compliance/Environmental%20Assessments%20-%20Narrabri>

---

%20Stage%202/NAR-%20Stage%202%20EA%20Specialist-Part%208%20-%20-Greenhouse%20Gas%20Assessment.pdf (дата обращения: 10.04.2026).

*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2006) H.S. Eggleston. L. Buendia. K. Miwa, Hayama, IGES. 2006.

*Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2019) E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, Geneva, IPCC, 2019.

Climate Change (2023) Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H. Lee. J. Romero, Geneva, IPCC.

Kotarba, M.J. (2001) Composition and origin of coalbed gases in the Upper Silesian and Lublin basins, Poland *Organic Geochemistry*, vol. 32, no. 1, pp. 163-180.

*Bowen Basin Coal Resources Assessment Report*. Bowen Basin Coal Study Group. KPMG. (Brisbane) Queensland Government (2021) URL: [https://www.resources.qld.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/1592855/bowen-basin-study-final-report.pdf](https://www.resources.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0008/1592855/bowen-basin-study-final-report.pdf) (дата обращения: 10.04.2026).

Li, Y., Yao, C., Yang, S. (2021) Study on origin and accumulation mechanism of coalbed methane in Miquan area of southern margin of Zhunggar Basin *Coal Science and Technology*, vol. 49, no. 4, pp. 220-226, URL: <https://www.mtkxjs.com.cn/en/article/pdf/preview/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.027.pdf> (дата обращения: 13.03.2026).

Lu, Z., Tao, Q. Li. (2021) Gas geochemistry and hydrochemical analysis of CBM origin and accumulation in the Tucheng syncline in western Guizhou Province *Geochemical Journal*, vol. 56, pp. 57-73, URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/2/56\\_GJ22005/\\_article/char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/2/56_GJ22005/_article/char/ja/) (дата обращения: 13.03.2026).

Lyons, P. C. (1996) *Coalbed methane potential in the Appalachian states of Pennsylvania, West Virginia, Maryland, Ohio, Virginia, Kentucky and Tennessee an overview* Open-File Report 96-735, Reston. Virginia, URL: <https://pubs.usgs.gov/of/1996/0735/report.pdf> (дата обращения: 16.03.2026).

Mazumder, S.I., Sosrowidjojo, B., Ficarra, A. (2010) *The Late Miocene coalbed methane system in the South Sumatra Basin of Indonesia*, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Queensland, Australia, Brisbane.

Mojica, L., Mariño, J. (2013) Exploration status and coal bed methane (CBM) possibilities in Boyaca (Colombia), *Boletín de Geología*. vol. 35, pp. 31-43, URL: [https://www.researchgate.net/publication/262436438\\_Exploration\\_status\\_and\\_coal\\_bed\\_methane\\_CBM\\_posibilities\\_in\\_Boyaca\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/262436438_Exploration_status_and_coal_bed_methane_CBM_posibilities_in_Boyaca_Colombia) (дата обращения: 10.04.2026).

Moore, T., Bowe, M., Nas, C. (2014) Nas High heat flow effects on a coalbed methane reservoir. East Kalimantan (Borneo), *Indonesia International Journal of*

*Coal Geology*, vol. 131, pp. 7-31, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516214001165> (дата обращения: 13.03.2026)..

Pashin, J., McIntyre-Redden, M., Mann, S., Kopaska-Merkel, D. (2014) *Water management strategies for improved coalbed methane production in the Black Warrior Basin, Final Report*, Geological Survey of Alabama, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, URL: <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-02/fe0000888-final-report.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

Rincón, M., Duarte, B., Parra, C. (2014) *Exploración gas metano asociado al carbón. Área Úmbita–Rondón*, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, URL: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B9/22004002524732/documento/pdf/210524732110-1000.pdf> (дата обращения: 12.03.2026)..

Scott, A. (1994) *Coalbed gas composition. Upper Cretaceous Fruitland Formation*. San Juan Basin. Colorado and New Mexico Open-File Report OF-94-02 Colorado Geological Survey. Denver Colorado, URL: <https://coloradogeologicalsurvey.org/publications/coalbed-gas-composition-cretaceous-fruitland-san-juan-basin-colorado-new-mexico> (дата обращения: 10.04.2026).

Shukla, P., Mendhe, A., Kamble, D. (2025) Influence of petrographic, geochemical and pore-associated matrix characteristics on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> sorption of coal and shale from Early Permian–Gondwana deposits, India, *ACS Omega*, vol. 10, no. 28, pp. 30060-30086, URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c11499> (дата обращения: 13.03.2026).

Simatupang, D., Amarullah, D. (2010) Coal bed methane potency of Tanjung Formation in Tanah Bumbu South Kalimantan *Buletin Sumber Daya Geologi*, vol. 5, no. 2, pp. 50-57, URL: <https://buletinsdg.geologi.esdm.go.id/index.php/bsdg/en/article/view/256> (дата обращения: 13.03.2026).

Thielemann, T., Cramer, B., Schippers, A (2004) Coalbed methane in the Ruhr Basin. Germany, a renewable energy resource? *Organic Geochemistry*, vol. 35, no. 11-12, pp. 1537-1549.

Wei, Q., Hu, B., Fang, H. (2022) Composition. origin. and accumulation model of coalbed methane in the Panxie coal mining area, Anhui Province, *China ACS Omega*, vol. 7, no. 21, pp. 17929-17940, doi: 10.1021/acsomega.2c01227, URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01227> (дата обращения: 13.03.2026).

Wei, Q., Chen, S., Yi, W. (2024) Gas content. geochemical characteristics and implications of coalbed methane from the Deep Area of Qi'Nan Coalmine in Huaibei, *Scientific Reports*, vol. 14, Article 28334, URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-79922-x> (дата обращения: 13.03.2026).

Xia, P., Zeng, F., Song, X (2016) Parameters controlling high-yield coalbed methane vertical wells in the B3 area, Xishan coal field, Shanxi, *China Energy Exploration*, vol. 34, no. 5, pp. 711-734, URL: <https://www.researchgate.net/>

publication/304403689\_Parameters\_controlling\_high-yield\_coalbed\_methane\_vertical\_wells\_in\_the\_B3\_area\_Xishan\_coal\_field\_Shanxi\_China (дата обращения: 13.03.2026).

Zhang, B., Deng, Z., Fu, X., Yin, K. (2021) A study on three-phase gas content in coal reservoirs and coalbed methane-water differential distribution in the western Fukang Mining Area. Xinjiang, *China ACS Omega*, vol. 6, no. 5, pp. 3999-4012, URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c05930> (дата обращения: 13.03.2026).

Статья поступила в редакцию (Received): 15.04.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 29.04.2026.

### **Для цитирования / For citation:**

Попов, Н.В., Миронов, А.А., Сингх, А.К. (2026) Обзор среднего состава газа угольных пластов по странам и макрорегионам, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 21-45, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-21-45.

Popov, N.V., Mironov, A.A., Singh, A.K. (2026) Overview of the average coal seam gas composition by country and region, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*, vol. XXXVII. no. 1-2, pp. 21-45, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-21-45.

## Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова острова Большой Соловецкий

*М.В. Морозова\*, М.А. Фролова, А.М. Айзеништадт,  
А.А. Тарасенко, А.А. Жеребцов*

ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
РФ, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

\*Адрес для переписки: *m.morozova@narfu.ru*

**Резюме.** Установлено, что окружающая природная среда острова Большой Соловецкий сталкивается с экологическими проблемами из-за растущего туризма, устаревшей инфраструктуры и ненадлежащего хранения отходов. В настоящее время на территории функционирует 16 экскурсионных маршрутов, а туристический поток в 2023 году достиг 60 тысяч человек. Ожидается, что пиковая нагрузка придется на 2029 год в связи с празднованием 600-летия основания первого монашеского поселения на Соловках. Для минимизации негативного воздействия на окружающую среду (почву, в т.ч. потенциальных сельскохозяйственных угодий) и здоровье населения необходимо осуществлять мониторинг и контроль загрязнения. Так, отбор проб осуществляли вблизи источников загрязнения, которые характеризовались различной степенью антропогенной нагрузки. Анализ результатов рН водной суспензии показал, что для исследованных территорий он находится в пределах  $4.4 \div 8.9$ , при средних фоновых значениях 8.1. Анализ данных по содержанию тяжелых металлов выявил превышения концентрации некоторых элементов над фоновыми значениями. Однако, рассчитанный суммарный показатель загрязнения показал, что все почвы на исследуемых территориях имеют допустимую категорию загрязнения. Вместе с тем наблюдается тенденция к накоплению тяжелых металлов в почвах. В целом, в верхнем слое почв острова Большой Соловецкий преимущественно аккумулируются цинк, свинец, хром, барий и стронций. В почвах отдельных исследуемых площадок также обнаружены ванадий и магний.

Полученные результаты исследований являются основанием для проведения дополнительных работ с целью уточнения источников загрязнения почвенного покрова, а также для создания комплексного мониторинга окружающей среды.

**Ключевые слова.** Почва, концентрация тяжелых металлов, рН водной вытяжки, комплекс тяжелых металлов, суммарный показатель загрязнения.

## Assessment of the level of heavy metal contamination of the soil cover of Bolshoy Solovetsky Island

*M.V. Morozova\*, M.A. Frolova, A.M. Ayzenshtadt,  
A.A. Tarasenko, A.A. Zherebtsov*

**Summary.** It has been established that the environment of Bolshoi Solovetsky Island faces environmental problems due to growing tourism, outdated infrastructure and improper storage of waste. Currently, there are 16 excursion routes on the territory, and the tourist flow in 2023 reached 60 thousand people. It is expected that the peak load will be in 2029 in connection with the celebration of the 600th anniversary of the founding of the first monastic settlement on Solovki. To minimize the negative impact on the environment (soil, including potential agricultural land) and public health, it is necessary to monitor and control pollution. So, sampling was carried out near pollution sources, which were characterized by various degrees of anthropogenic load. Analysis of the results of the pH of the aqueous suspension showed that for the studied areas it is in the range of  $4.4 \div 8.9$ , with average background values of 8.1. Analysis of data on the content of heavy metals revealed an excess of the concentration of some elements over the background values. The calculated total pollution index showed that all soils in the studied areas have an acceptable pollution category, but there is a tendency towards the accumulation of heavy metals in soils. In general, zinc, lead, chromium, barium and strontium are mainly accumulated in the upper layer of the soils of Bolshoi Solovetsky Island. Vanadium and magnesium were also found in the soils of individual study sites.

The obtained research results are the basis for additional work to clarify the sources of soil pollution, as well as for the creation of comprehensive environmental monitoring

**Keywords.** Soil, concentration of heavy metals, pH of water extract, complex of heavy metals, total pollution index.

## Введение

Поселок Соловецкий, расположенный на одноименном архипелаге в Белом море, является уникальным историческим и культурным центром России. Соловецкий монастырь, внесенный в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, привлекает многочисленных туристов и паломников, что оказывает влияние на экологическое состояние окружающей среды (Белекова, 2021). Так, постоянный рост туристического потока вынуждает развивать инфраструктуру архипелага Соловецкий (Цветков, 2020; Авилова и др., 2023). К примеру, в настоящее время на территории действуют 16 экскурсионных маршрутов, а туристический поток по данным 2023 года составил 60 тыс. человек. Пиковую нагрузку прогнозируют на 2029 год, когда по указу президента России (от 19.10.2023 № 782) будет праздноваться 600-летие основания на Соловках первого монашеского поселения.

Помимо растущего туристического потока, на состояние природной экосистемы острова оказывают влияние действующие инженерные сооружения,

являющиеся неотъемлемой частью инфраструктуры п. Соловецкий (аэропорт, дизельная электростанция, участки грузового порта, причальный комплекс и др.), а также ненадлежащее хранение твердых коммунальных отходов (Фролова и др., 2024). В настоящее время ведется строительство нового современного полигона для утилизации твердо-бытовых отходов (ТБО), ввод в эксплуатацию которого, на наш взгляд, позволит урегулировать часть устоявшихся проблем, связанных с утилизацией ТБО на архипелаге (рис. 1). Так, на действующем полигоне уже накоплено не менее 31000 м<sup>3</sup> твердых коммунальных отходов, что значительно превышает нормативные показатели для отведенной территории. Сложившаяся ситуация представляет опасность не только для уникальной природы заповедной зоны островов архипелага, но и для безопасности проживания на данной территории местного населения (численность местного населения составляет около 1 тыс. человек) и их хозяйственной деятельности.



**Рисунок 1.** Проект полигона для захоронения ТБО (источник: <https://fundsolovki.ru>):

- 1 – ограждение с въездными воротами и КПП; 2 – административно-бытовые помещения;  
3 – цех сортировки и упаковки ТБО; 4 – участок грохочения; 5 – участок производства техногрунта; 6 – крытая стоянка спецтехники; 7 – площадка для тюков (хранение вторичных материальных ресурсов); 8 – площадка для контейнеров (хранение упакованных отходов);  
9 – локальные очистные сооружения; 10 – резервуары и насосная станция системы пожаротушения

**Figure 1.** Solid waste landfill project (source: <https://fundsolovki.ru>): 1 – fence with entrance gates and checkpoint; 2 – administrative and amenity rooms; 3 – solid household waste sorting and packaging shop; 4 – screening area; 5 – technogrunst production site; 6 – covered parking of special equipment; 7 – area for bales (storage of secondary material resources); 8 – site for containers (storage of packaged waste); 9 – local treatment facilities; 10 – fire extinguishing system tanks and pump station

Согласно новому проекту, полигон ТБО (далее, объект №1) включает сортировку, компостирование, упаковку и вывоз накопленных отходов на материк для последующей утилизации (Шаталов, Подкопаева, 2020; Yaashikaa et al., 2022; Mor, Ravindra, 2023; Sondh et al., 2022). Кроме того, будет проведена замена загрязненного грунта на всей территории полигона.

Второй, не мало важный, источник загрязняющих веществ – причал «Тамарин» (далее, объект № 2). Эта пристань – единственная на архипелаге, способная принимать большие круизные лайнеры. В текущий момент причал закрыт для посещения, так как его металлические конструкции, сваи и плиты, сильно проржавели и представляют опасность для швартовки кораблей и высадки пассажиров. В 2022 году было получено разрешение на строительство и реконструкцию существующего причала (Межлумян и др., 2024; Багдасарян 2020; Tan et al., 2024). Новый проект, охватит не только восстановление существующего причала Тамарин, но и строительство с последующей организацией дополнительного терминала – грузового участка речпорта (далее, объект № 3) для приема и разгрузки нефтеналивных танкеров (рис. 2-3).



**Рисунок 2.** Проектируемый технологический причал для нефтеналивных танкеров (<https://region29.ru>)

**Figure 2.** Planned process berth for oil tankers (<https://region29.ru>)



**Рисунок 3.** Причал «Тамарин» (<https://www.pomorie.ru>)

**Figure 3.** Berth "Tamarin" (<https://www.pomorie.ru>)

Из-за удаленности архипелага, на его территории в 1930 г. было построено здание дизельной электростанции (ДЭС), которая располагается на берегу Святого озера, к юго-востоку от Соловецкого монастыря. Данный объект стал полноценной заменой существующей гидроэлектростанции (ГЭС), единственного источника электроэнергии, работающего на Соловках с начала XX века (Коломеец, 2022; Мясоедов, Савченко, 2022; Yu, et al., 2024; Майорова и др., 2020). Однако, работа ДЭС (далее, объект № 4) основана на ежегодном завозе дизельного топлива и бензина, которые перекачиваются в специальные хранилища. Данные работы постоянно сопровождает риск периодического разлива нефтепродуктов.

Рядом с ДЭС расположена автозаправочная станция (АЗС), которая также не улучшает экологическую ситуацию острова (далее, объект № 5) (Баев, Сафронова, 2024; Павлова, Ваниев, 2022; Гармонов, и др., 2022; Антипина, 2021). Из-за ненадлежащего состояния причала Тамарин, выросла активность работы аэропорта Соловецкий (далее, объект № 6). Летающий на остров Л-410, обладая хорошими летными качествами, тем не менее выбрасывает в окружающую среду компоненты (Wang et al., 2025), которые в конечном итоге поступают в почвенный покров островов (Ересько, Клебанович, 2023; Ельчиной и др., 2021). Так, исследования состояния почв пока-

зали, что их биологическая активность постепенно снижается, а загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) представляет собой серьезную экологическую проблему, способную оказывать негативное воздействие на здоровье человека, состояние растительного и животного мира, а также на качество сельскохозяйственной продукции архипелага (Расулов, и др., 2021; Сукиасян, и др., 2021; Liu, et al., 2025). Поэтому, если рассматривать почвенный покров в качестве потенциальных сельскохозяйственных угодий, важное влияние в плане распространения тяжелых металлов через растительность, оказывает такой показатель, как его кислотность (или щелочность). Учитывая уникальную историческую и экологическую ценность поселка Соловецкий, а также потенциальные риски загрязнения почв ТМ, проведение мониторинга и контроля за состоянием почвенного покрова является крайне актуальной задачей. Поэтому, *целью работы* является исследование влияния производственных объектов на почвенную среду поселка Соловецкий (концентрация ТМ, pH водной вытяжки) и классификация загрязнённости грунта по комплексу тяжелых металлов.

Результаты данных исследований, по нашему мнению, должны входить в состав комплексного мониторинга состояния окружающей среды в частности почвенного покрова по показателю «ТМ» с оценкой динамики уровня загрязнения и разработкой рекомендаций, позволяющих минимизировать негативное воздействие данного фактора на окружающую среду и здоровье населения.

## Материалы и методы исследований

Почвы острова представляют собой глееподзолистые и подзолистые иллювиально-гумусовые отложения (Егоров и др., 1977). Почвенный покров неоднороден на сравнительно небольшой площади. Характер почв в основном определяется рельефом и почвообразующими породами (песками).

Расположение пробных площадок (ПП) было выбрано вблизи основных, вышеуказанных, источников загрязнения (6 объектов), которые характеризовались различной степенью антропогенной нагрузки (рис. 4). В качестве контрольной («условно» фоновой) пробной площадки выбран участок, практически не подверженный выраженной техногенной нагрузке, расположенный в 5 км от Соловецкого монастыря, рядом с о. Щучье. При этом, несмотря на некоторое различие с анализируемыми площадками природных условий, основным критерием для выбора местоположения контрольной точки сравнения использовалось достаточная удаленность местности отбора от источников возможных техногенных загрязнений, что, по нашему мнению, исключало миграционное попадание солей, содержащих анализируемые элементы. Так, наименьшее расстояние от точки отбора «условно» фоновых образцов до ближайшего источника загрязнения (грузовой участок речпорта) составляет около 3.8 км.

В санитарно-защитных зонах, окружающих каждый объект, с экспериментальных участков были взяты образцы верхнего слоя почвы с глубины не

более 20 см (август 2024 год). Процедура отбора соответствовала ГОСТ 17.4.3.01-2017. Точечные пробы (не менее 5 проб, каждая по 200 г) отбирались на пробной площадке из одного слоя методом конверта, по диагонали. Полученная объединенная проба формировалась путем перемешивания всех точечных проб, взятых на конкретном экспериментальном участке. Характеристика пробных площадей представлена в табл. 1.



Рисунок 4. Участки отбора почвенных проб на территории о. Большой Соловецкий

Figure 4. Soil sampling sites in Bolshoy Solovetsky Island

**Таблица 1.** Пробные площадки и точки отбора проб почвы

**Table 1.** Test sites and soil sampling points

| Объект                          | Кол-во<br>ПП | Координаты<br>места отбора | Краткое описание местности                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------|--------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| «Условно»<br>фоновый<br>участок | УФ           | 65.065248,<br>35.66081     | Территория, не подвергающаяся антропогенному воздействию или испытывающая его в минимальной степени. Участок значительно удален от очагов загрязнения.                                                                                                                                               |
| Полигон<br>ТБО                  | 1            | 65.0202337,<br>35.7320505  | Вблизи места отбора проб расположена стройка комплекса по обращению с отходами производства и потребления, наблюдается складирование строительного мусора и бытовых отходов, шумовое загрязнение от строительной техники.                                                                            |
| Причал<br>Тамарин               | 2.1          | 65.0312536,<br>35.690771   | Наблюдается мусор в виде ржавых бочек, балок, ПЭТ пакетов. Место складирования пластиковых конструкций. Береговая линия покрыта выброшенными водорослями, мертвыми медузами, раковинами моллюсков                                                                                                    |
|                                 | 2.2          | 65.030859,<br>35.692518    | Наличие заброшенного остова, разрушенного деревянного помоста, территория частично выложена ж/б плитами, вблизи точки забора располагаются подсобные помещения, элеваторы, места складирования материалов, береговая линия покрыта выброшенными водорослями, мертвыми медузами, раковинами моллюсков |
| Грузовой<br>участок<br>речпорта | 3.1          | 65.0316744,<br>35.6893783  | Наблюдается мусор в виде ржавых бочек, балок, ПЭТ пакетов. Береговая линия покрыта выброшенными водорослями, мертвыми медузами, раковинами моллюсков                                                                                                                                                 |
|                                 | 3.2          | 65.031342,<br>35.690164    | Наблюдается мусор в виде ржавых бочек, балок, ПЭТ пакетов. Место складирования пластиковых конструкций. Береговая линия покрыта выброшенными водорослями, мертвыми медузами, раковинами моллюсков                                                                                                    |
| ДЭС                             | 4.1          | 65.0220479,<br>35.7127598  | Вблизи участка забора проб расположен деревянный пирс. Наличие плотного растительного покрова, наличие иных загрязнений и запахи не обнаружены                                                                                                                                                       |
|                                 | 4.2          | 65.0214905,<br>35.7138142  | Наличие плотного растительного покрова, наличие иных загрязнений и запахов не обнаружено                                                                                                                                                                                                             |
|                                 | 4.3          | 65.0208937,<br>35.7175733  | Вблизи места отбора проб расположены здания теплоэлектростанции, АЗС и склад ГСМ. Наличие загрязнений и запахи не обнаружены                                                                                                                                                                         |

| Объект   | Кол-во<br>ПП | Координаты<br>места отбора | Краткое описание местности                                                                                                                                                                                         |
|----------|--------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| АЗС      | 5.1          | 65.0202606,<br>35.7147372  | Вблизи места отбора проб расположено демонтируемое здание, место складирования строительного мусора и бытовых отходов, шумовое загрязнение от работающей дизельной электростанции и стройки. Запахи не обнаружены. |
|          | 5.2          | 65.0200935,<br>35.7185004  | Наличие плотного растительного покрова, загрязнение бытовыми отходами (ПЭТ пакетами, стеклянными бутылками и т.д.), запахи не обнаружены                                                                           |
|          | 5.3          | 65.0192713,<br>35.7154027  | Вблизи места отбора проб расположены здания теплостанции, АЗС и склад ГСМ. Наличие загрязнений и запахи не обнаружены                                                                                              |
| Аэропорт | 6.1          | 65.0327603,<br>35.7114358  | Наличие плотного растительного покрова, наличие иных загрязнений и запахи не обнаружены                                                                                                                            |
|          | 6.2          | 65.0320532,<br>35.7283709  | Наличие плотного растительного покрова, наличие иных загрязнений и запахи не обнаружены                                                                                                                            |
|          | 6.3          | 65.026521,<br>35.748789    | Наличие плотного растительного покрова, какие-либо загрязнения и запахи не обнаружены                                                                                                                              |
|          | 6.4          | 65.0297014,<br>35.7229005  | Наличие плотного растительного покрова, наличие иных загрязнений и запахов не обнаружено. Точка забора проб находится в непосредственной близости от входа в аэропорт                                              |

Оценку уровня химического загрязнения почв как индикатора неблагоприятного воздействия на здоровье населения проводили по показателям (СанПиН 1.2.3685-21): коэффициента концентрации химического вещества ( $K_c$ ) и суммарному показателю загрязнения ( $Z_c$ ):

$$K_c = (C_i / C_{\phi i}) \quad (1)$$

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1), \quad (2)$$

где  $C_i$  – фактическое содержание определяемого вещества в почве, мг·кг<sup>-1</sup>;  
 $C_{\phi i}$  – региональное фоновое содержание определяемого вещества в почве, мг·кг<sup>-1</sup>;

$K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го компонента загрязнения;

$n$  – количество определяемых веществ, шт.

Отобранные пробы почвенного покрова анализировались в ЦКП «Арктика» САФУ имени М.В. Ломоносова по показателям: содержания ТМ и рН водной вытяжки.

Величина рН водной вытяжки определялась методом потенциометрии (ГОСТ 26423-85) с использованием рН-метр-ионметра «Эксперт-001-1-0,1»

и стеклянного комбинированного электрода ЭСК-10601/7 (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия)

Валовое содержание тяжелых металлов в почвах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) согласно методике М 02-0203-09 «Измерение массовой доли тяжелых металлов в порошкообразных пробах почв», с использованием спектрофотометра EDX-800 фирмы Shimadzu (Япония).

Исследования анализируемых образцов проводились параллельно на трех пробах, полученные данные обрабатывались принятыми методами математической статистики.

## Результаты и обсуждение

Анализ результатов измерений величины рН водной суспензии показал, что для исследованных территории почв поселка Соловецкий он в основном находится в пределах  $4.4 \div 8.9$ , при средних «условных» фоновых значениях 8.1. Наблюдается подкисление почвы вблизи территорий полигона ТБО.

В образцах грунта, взятых около пристани «Тамарин» (ПП 2.1) и грузовой зоны речного порта (ПП 3.1 и 3.2), фиксируется тенденция к повышению рН (в среднем 8.1). Это указывает на снижение миграции химических элементов с последующей аккумуляцией их в почвах. Вероятно, данный факт связан с тем, что береговая зона между этими объектами расположена в искусственно образованной акватории, которая препятствует разбавлению загрязняющих компонентов (нефтепродуктов, смол, бензина) морской водой. Также, периодические затопления дока способствуют распространению вредных веществ по поверхности грунта в этой области. Например, на второй площадке для проб у пристани «Тамарин» (вдали от бухты и речного порта) рН соответствует нейтральному значению.

Почвы, находящиеся вблизи дизельной электростанции, автозаправочной станции и аэропорта, характеризуются благоприятными свойствами для работы почвенных ферментов. Так, средняя величина рН для них составила 5.8, следовательно территории не подвержены чрезмерному загрязнению и обладают способностью к самоочищению.

Если учитывать факт оптимального значения рН водной вытяжки для хорошего плодородия почвы, равное  $5 \div 7$  единиц, то можно констатировать, что данный показатель для «условных» фоновых образцов превышает указанный диапазон. Так, установлено, что в щелочной почве наблюдается затруднение процесса усвоения растениями, например, цинка, магния. Однако, вблизи полигона ТБО, здания дизельной электростанции и АЗС возможна «растительная» миграция тяжелых металлов.

Вместе с тем, следует отметить установленный факт влияния содержания нефтепродуктов в почвенном покрове на величину рН водной вытяжки. Так, в (Мерзлякова, Околелова, и др., 2017; Шаркова, 2011) отмечается, что загрязнение нефтепродуктами приводит к снижению почвенной кислотности, а их содержание в точках отбора проб, например, объекта (коды № 6.2 и 6.3) «Аэропорт» изменяется в диапазоне от 1900 до 2300 мг/кг. В то же время, ано-

мально высокое значение рН «условно» фоновых проб может быть связано, скорее всего, с отличительными особенностями почвы, залегающей в данной местности (к примеру, загрязненность пробы минералами с избыточной щелочностью), так как концентрация нефтепродуктов в данной точке – 37-77 мг/кг. Так, на территории п. Соловецкий отмечаются почвы с высокой щелочной реакцией (рН>8), которые встречаются локально, и связаны с выходом карбонатных пород на поверхность. Именно этот факт и определяет значение рН в данной точке отбора.

Анализ данных по содержанию тяжелых металлов (табл. 2) показал, что наблюдаются превышения концентрации некоторых элементов над «условно» фоновыми значениями (Zn, Pb, Cr, Ba, Sr, V и Mg).

**Таблица 2.** Содержание тяжелых металлов в почвах (мг·кг<sup>-1</sup>)

**Table 2.** Heavy metal content in soils (mg·kg<sup>-1</sup>)

| Объект                       | ПП  | рН вод. выт. | Zn    | Pb    | Cr  | Ni    | Cu    | Mo   | Ba    | Sr  | V     | Mg     |
|------------------------------|-----|--------------|-------|-------|-----|-------|-------|------|-------|-----|-------|--------|
| Условный фоновый             | УФ  | 8.1          | < 42  | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | 620   | 310 | < 80  | < 6200 |
| ТБО                          | 1   | 5.8          | 150   | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | 570   | 320 | < 80  | < 6200 |
| Причал «Тамарин»             | 2.1 | 8.2          | 310   | 100   | 100 | < 200 | < 200 | < 38 | 1200  | 290 | 80    | < 6200 |
|                              | 2.2 | 6.6          | 80    | < 24  | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 680   | 320 | < 80  | < 6200 |
| Речпорт                      | 3.1 | 7.8          | 50    | < 24  | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 680   | 340 | < 80  | < 6200 |
|                              | 3.2 | 8.4          | 100   | 30    | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 510   | 310 | < 80  | < 6200 |
| ДЭС                          | 4.1 | 6.2          | < 42  | < 24  | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 760   | 330 | < 80  | < 6200 |
|                              | 4.2 | 6.0          | 70    | 50    | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 640   | 340 | < 80  | < 6200 |
|                              | 4.3 | 7.2          | < 42  | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | 730   | 330 | < 80  | < 6200 |
| АЗС                          | 5.1 | 4.6          | < 42  | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | 320   | 290 | < 80  | < 6200 |
|                              | 5.2 | 5.8          | 160   | 50    | 90  | < 200 | < 200 | < 38 | 580   | 340 | 80    | 6800   |
|                              | 5.3 | 8.3          | 120   | 130   | 90  | < 200 | < 200 | < 38 | 520   | 310 | 90    | 8670   |
| Аэропорт «Соловки»           | 6.1 | 4.4          | < 42  | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | < 400 | 200 | < 80  | < 6200 |
|                              | 6.2 | 6.5          | 160   | < 24  | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 570   | 340 | < 80  | < 6200 |
|                              | 6.3 | 8.9          | < 42  | < 24  | 70  | < 200 | < 200 | < 38 | < 400 | 220 | < 80  | < 6200 |
|                              | 6.4 | 4.9          | 70    | < 24  | 80  | < 200 | < 200 | < 38 | 520   | 310 | < 80  | < 6200 |
| ПДК/ОДК, мг·кг <sup>-1</sup> |     |              | -/220 | -/130 | н/д | -/80  | -/132 | н/д  | н/д   | н/д | 150/- | н/д    |
| Класс опасности              |     |              | 1     | 1     | 2   | 2     | 2     | 2    | 3     | 3   | 3     | 3      |

**Примечание:** величины ПДК/ОДК взяты из СанПиН 1.2.3685-21 (табл. 4.1);

«н/д» – нет данных;

обозначение « < » перед числом показывает, что найденное значение меньше указанного

Из данных (табл. 2) следует, что для 28% проб почв (из всех пробных площадок) наблюдается превышение концентраций ТМ по сравнению с «условно» фоновым участком (выделены полужирным). Также наблюдается превышение ОДК в одной из точек около причала на 90 мг/кг. Кроме того, 68% измеренных значений выходят за предел обнаружения прибора (получены низкие значения). Несмотря на это, установлено, что концентрации никеля и меди во всех точках не соответствуют установленным нормативам ОДК ( $Ni > 120$  мг/кг,  $Cu > 68$  мг/кг). В целом же валовые содержания тяжелых металлов не превышают ПДК/ОДК (СанПиН 1.2.3685-21, Табл. 4.1).

В табл. 3 представлены данные по вариабельности полученных значений.

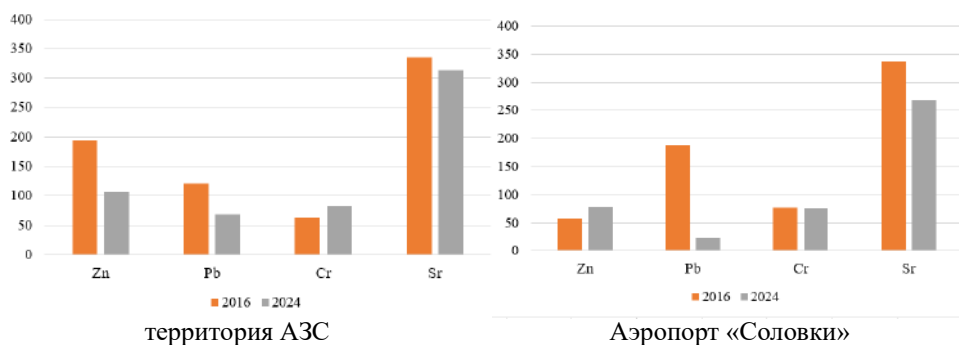
**Таблица 3.** Среднее квадратичное отклонение концентраций тяжелых металлов от «условно» фонового значения

**Table 3.** Mean quadratic deviation of heavy metal concentrations from the "conditional" background value

| Объект                | Zn           | Pb          | Cr          | Ni    | Cu    | Mo   | Ba           | Sr          | V    | Mg            |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------|-------|-------|------|--------------|-------------|------|---------------|
| ТБО                   | ±54          | ±0          | ±0          | ±0    | ±0    | ±25  | ±5           | ±           | ±0   | ±0            |
| Причал<br>«Тамарин»   | ± <b>118</b> | ±36         | ± <b>12</b> | ±0    | ±0    | ±0   | ± <b>260</b> | ±12         | ±0   | ±0            |
| Речпорт               | ±26          | ±3          | ±5          | ±0    | ±0    | ±0   | ±70          | ±14         | ±0   | ±0            |
| ДЭС                   | ±12          | ±11         | ±5          | ±0    | ±0    | ±0   | ±59          | ±11         | ±0   | ±0            |
| АЗС                   | ±51          | ± <b>43</b> | ±10         | ±0    | ±0    | ±0   | ±115         | ±18         | ±4   | ± <b>1013</b> |
| Аэропорт<br>«Соловки» | ±46          | ±0          | ±5          | ±0    | ±0    | ±0   | ±89          | ± <b>55</b> | ±0   | ±0            |
| Условный<br>фоновый   | < 42         | < 24        | 70          | < 200 | < 200 | < 38 | 620          | 310         | < 80 | < 6200        |

Анализ данных (табл. 3) показал, что в пробах почвы у причала Тамарин присутствуют достаточно большие отклонения от среднего значения по цинку, хрому и барии. На пробных площадках у АЗС отклонения есть по свинцу и магнию. У аэропорта повышена концентрация стронция. Однако, данные отклонения не превышают ПДК/ОДК, а их незначительное накопление может объясняться деятельностью морских и воздушных судов, а также автотранспорта.

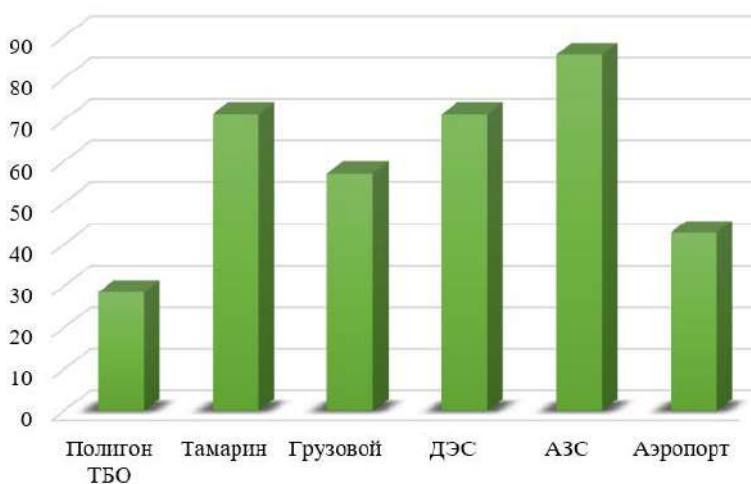
Для сравнительного анализа изменения содержания тяжелых металлов в почве п. Соловецкий за период 2016-2024 г.г. использованы данные по концентрации таких элементов, как Zn, Pb, Cr и Sr, полученные ранее в (Попова, Андреева, Никитина, 2016) и нами, в результате экспедиционной поездки в 2024 году (рис. 5). Так, за восемь лет содержание определяемых элементов снизилось: для АЗС содержание цинка и свинца на 40%, стронций на 6.5%; для аэропорта концентрация свинца на 80%, стронция на 68%, хрома – практически не изменилась. При этом наблюдается незначительное повышение содержания хрома (30%) и цинка (21%) на данных территориях, соответственно.



**Рисунок 5.** Динамика загрязнения почв о. Большой Соловецкий тяжелыми металлами

**Figure 5.** Dynamics of soil pollution on Bolshoi Solovetsky Island with heavy metals

На рис. 6 представлена степень загрязнения ПП по состоянию на 2024 год.



**Рисунок 6.** Процент загрязнения почвы тяжёлыми металлами по объектам исследования

**Figure 6.** Percentage of soil contamination with heavy metals by study objects

Рис. 6 демонстрирует, что максимальные уровни загрязнения тяжелыми металлами зафиксированы вблизи автозаправочных станций, причала «Тамирин» и дизельной электростанции. Вероятными источниками загрязнения на этих участках могут являться утечки топлива, выхлопные газы автотранспорта и различные смазочные материалы. Таким образом, несмотря на относительно благоприятные показатели водной вытяжки (рН), почвы в указанных локациях подвержены значительному загрязнению цинком (67%), хромом (60%), барием (40%), свинцом (27%), стронцием (8%), ванадием (3%) и магнием (2%). Кроме того, на отдельных пробных площадках наблюдается повышенное содержание Zn (превышение фоновых концентраций исследуемых веществ в 2-7 раз), Pb (в 5 раз), Ba (в 2 раза) и Mg (в 1.5 раза).

**Таблица 4.** Коэффициент концентрации химических веществ (тяжелых металлов)  
в пробах почв

**Table 4.** Concentration factor of chemical substances (heavy metals) in soil samples

| Объект                | Коэффициент концентрации тяжелых металлов в почве, |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Z <sub>c</sub> |
|-----------------------|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|
|                       | Zn                                                 | Pb  | Cr  | Ni  | Cu  | Mo  | Ba  | Sr  | V   | Mg  |                |
| ТБО                   | 3.6                                                | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 3.6            |
| Причал<br>«Тамарин»   | 7.4                                                | 4.2 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.9 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 11.5           |
|                       | 1.9                                                | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.9            |
| Речпорт               | 1.2                                                | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | -              |
|                       | 2.4                                                | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.4            |
| ДЭС                   | 1.0                                                | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | -              |
|                       | 1.7                                                | 2.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 2.8            |
|                       | 1.0                                                | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | -              |
| АЗС                   | 1.0                                                | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | -              |
|                       | 3.8                                                | 2.1 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 1.1 | 1.0 | 1.1 | 4.9            |
|                       | 2.9                                                | 5.4 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 1.4 | 7.3            |
| Аэропорт<br>«Соловки» | 1.0                                                | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.6 | 0.6 | 1.0 | 1.0 | -              |
|                       | 3.8                                                | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 3.8            |
|                       | 1.0                                                | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.6 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | -              |
|                       | 1.7                                                | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.7            |

Рассчитанный на основе коэффициентов концентрации ТМ в почве суммарный показатель загрязнения (табл. 4), показал, что все почвы на рассматриваемых пробных площадках имеют допустимую категорию загрязнения, (СанПиН 1.2.3685-21).

Вместе с тем, наблюдается незначительное повышение уровня концентрации ТМ в почве анализируемых территорий. Поэтому, необходимы дополнительные исследования, направленные на уточнение источников загрязнения почвенного покрова (природные, антропогенные) прежде всего цинком, свинцом, хромом, барием и стронцием. Также необходимо определить точное значение содержания никеля, меди и ванадия, высокий уровень концентрации этих элементов отмечается даже в «условно» фоновых образцах.

**Заключение**

Изучение пространственного распределения геохимических параметров почвенного покрова дало возможность определить тенденции незначительного накопления тяжелых металлов. Были идентифицированы основные факторы техногенного влияния на экологическую обстановку и здоровье жителей поселка (среди них – полигон твердых бытовых отходов, пристань «Тамарин», грузовая зона речного порта, дизельная электростанция, автозаправочная станция и аэропорт).

Анализ водной вытяжки выявил, что в окрестностях полигона ТБО, ДЭС, АЗС и аэропорта наблюдается повышение кислотности почв. Значения

рН образцов, взятых около пристани «Тамарин» и грузового участка речпорта, демонстрируют сдвиг в сторону щелочной реакции, что характерно для «условно» фоновых объектов.

Определение общего содержания тяжелых металлов показало превышение концентраций некоторых элементов по сравнению с «условно» фоновыми показателями. В целом, в верхнем слое почв п. Соловецкий преимущественно аккумулируются цинк, свинец, хром, барий и стронций. В почвах отдельных исследуемых площадок также обнаружены ванадий, хром и магний.

В настоящий момент можно констатировать факт благополучного экологического состояния почв о. Большой Соловецкий, которые характеризуются допустимой категорией уровня загрязнений, но необходим дальнейший мониторинг по изучению путей миграции элементов и поиску источников их накопления.

*Работа выполнена за счет средств проекта государственного задания FSRU-2024-0037 «Комплексная оценка антропогенного воздействия на территорию поселка Соловецкий острова Большой Соловецкий»*

### Список литературы

Авилова, Е.А., Демидова, В.Д., Кузина, Е.Ю. (2023) Стратегии развития туристического бизнеса в современных условиях, В сборнике: *Актуальные проблемы менеджмента и маркетинга в области внешнеэкономической деятельности. сборник научных статей студентов и аспирантов*, Москва, с. 7-15.

Антипина, О.И. (2021) Анализ рисков технологических процессов слива-налива на автозаправочных станциях российской федерации, *Modern Science*, № 1-1, с. 418-427.

Багдасарян, А.А. (2020) Основные экологические проблемы Северного морского пути в перспективе его развития, *Российская Арктика*, № 9, с. 17-29.

Баев, А.А., Сафронова, И.Г. (2024) Анализ экологического состояния автозаправочных станций, *Тенденции развития науки и образования*, № 109-13, с. 14-17.

Белекова, А.Т. (2021) Стратегии управления объектами всемирного природного наследия ЮНЕСКО: опыт России, *Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отделение общественных наук*, № 1(262), с. 21-28.

Гармонов, К.В., Жерлыкина, М.Н., Макаров, А.Р., Жерлицина, А.С. (2022) Обоснование мероприятий по повышению экологической безопасности городских автозаправочных станций, *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*, № 2(21), с. 96-105.

Егоров, В.В., Фридланд, В.М., Иванова, Е.Н. и др. (1977) *Классификация и диагностика почв СССР*, Москва, Колос, 223 с.

Ельчиногова, О.А., Кузнецова, О.В., Чичинова, Г.В., Дементьева, О.К., Кудачинова, А.А. (2021) Влияние туристско-рекреационной деятельности на

физические свойства почв прибрежной территории Телецкого озера, в сборнике: *Научный вестник Горно-Алтайского государственного университета*, ответственный редактор М.Г. Сухова, Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, с. 26-34.

Ересько, М.А., Клебанович, Н.В. (2023) Показатели физических свойств почв для комплексной экологической оценки состояния почвенного покрова, *Земля Беларуси*, № 3, с. 44-52.

Жаббаров, З.А., Атоева, Г.Р., Сайитов, С.С. (2021) Загрязнение почв тяжелыми металлами вокруг полигона твердых бытовых отходов города Ташкента, *Научное обозрение. Биологические науки*, № 2, с. 17-23.

Коломеец, С.Д. (2022) Повышение эффективности функционирования дизельных электростанций, *Матрица научного познания*, № 3-1, с. 45-49.

Майорова, Ю.А., Пашук, Е.В., Смокталь, Н.Н. (2020) Способы снижения потребления топлива дизельными электростанциями, *Энергетические установки и технологии*, т. 6, № 2, с. 77-87.

Межлумян, М.З., Степкина, А.В., Крикун, К.С. (2024) Приоритетные национальные проекты в Российской Федерации: ключевые цели и ожидаемые результаты, *Региональная и отраслевая экономика*, № 1, с. 135-141.

Мерзлякова, А.С., Околелова, А.А., Заикина, В.Н., Пасикова, А.В. (2017) Изменение свойств нефтезагрязненных почв, *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, № 2, с. 173-180.

Мясоедов, Ю.В., Савченко, Д.А. (2022) Повышение надежности и качества электроснабжения территориально изолированных районов путем перевода дизельных электростанций в гибридные, *Вестник Амурского государственного университета. Серия Естественные и экономические науки*, № 97, с. 97-101.

Павлова, Л.В., Ваниев, А.Ю. (2022) Влияние транспортных средств и автозаправочных станций на здоровье и экологию, *Тенденции развития науки и образования*, № 86-8, с. 132-135.

Попова, Л.Ф., Андреева, Ю.И., Никитина, М.В. (2016) Оценка уровня загрязнения почвенно-растительного покрова острова Большой Соловецкий тяжелыми металлами, *Принципы экологии*, № 2. с. 62-69, doi: 10.15393/j1.art.2016.5002.

Расулов, О.У., Каримов, Б.Ю., Зоиров, Ф.Б., Халифаев, Ф.А. (2021) Анализ загрязнения почвы тяжелыми металлами в условиях сильного загрязнения промышленных зон, *Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования*, № 3(55), с. 53-57.

Сукиасян, А.Р., Киракосян, А.А. (2020) Загрязнение тяжелыми металлами речной воды и прибрежной почвы, близлежащих к территории хвостохранилища, *Вода и экология, проблемы и решения*, № 3(83), с. 79-84.

Фролова, М.А., Морозова, М.В., Гарамов, Г.А., Айзенштадт, А.М. (2024) Оценка антропогенного воздействия на территорию поселка Соловецкий (Соловецкий архипелаг, Архангельская область), *Жилищное строительство*, № 12, с. 55-61.

Цветков, А.Ю. (2020) Транспортно-инфраструктурные основы стратегии развития туризма в архангельской области, *Арктика и Север*, № 38, с. 44-55.

Шаркова, С.Ю. (2011) Изменение химических характеристик почвы под действием нефтезагрязнения, *Известия Пензенского государственного педагогического университета имени В. Г. Белинского*, № 25, с. 610-613.

Шаталов, П.В., Подкопаева, А.Л. (2020) Переработка отходов, как решение глобальной экологической проблемы в мире, *Инновации, технологии и бизнес*, № 1 (7), с. 97-101.

Liu, H., Chang, J., Zhao, F., Shen, L., Yang, K., Chen, L. (2025) Impact of urban expansion on soil heavy metal pollution. A comparison of new and old urban blocks, *Ecological Frontiers*, doi.org/10.1016/j.ecofro.2025.05.020.

Mor, S., Ravindra, K. (2023) Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries. Environmental impacts, challenges and sustainable management practices, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 174, p. 510-530.

Sondh, S., Upadhyay, D.S., Patel, S., Patel, R.N. (2022) A strategic review on Municipal Solid Waste (living solid waste) management system focusing on policies, selection criteria and techniques for waste-to-value, *Journal of Cleaner Production*, p. 131908.

Tan, S., Zhang, T., Yang, Z. (2024) Vertical distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s pollution in a sediment profile from Bohai Sea, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 209, p. 117089, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117089.

Wang, S., Liu, H., Rinaldi, M., Tsang, Y.P. (2025) Evaluating the impact of air corridors on the environment and public interests, *Transportation Research Part D. Transport and Environment*, vol. 143, p. 104732, doi.org/10.1016/j.trd.2025.104732.

Yaashikaa, P.R., Kumar, P.S., Nhung, T.C., Hemavathy, R.V., Jawahar, M.J., Neshanthini, J.P., Rangasamy, G. (2022) A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis, *Chemosphere*, vol. 309, p. 1, Art. 136627, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136627.

Yu, Li, Yixi, Cuomu, Yiming, Gao, Guoqin, Lv, Weiwei, Lin, Sirui, Li. (2024) Study on green power supply modes for heavy load in remote areas, *Global Energy Interconnection*, vol. 7.I.4, p. 475-485, doi.org/10.1016/j.gloe.2024.08.011.

## References

Avilova, E.A., Demidova, V.D., Kuzina, E.Yu. (2023) Strategii razvitiya turistskogo biznesa v sovremennykh usloviyakh [Strategies for the development of the tourism business in modern conditions], *V sbornike Aktual'nye problemy menedzhmenta i marketinga v oblasti vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti. sbornik nauchnykh statej studentov i aspirantov*, Moscow, Russia, pp. 7-15.

Antipina, O.I. (2021) Analiz riskov tekhnologicheskikh protsessov slivaliva na avtozapravochnykh stantsiyakh rossijskoj federatsii [Analysis of the risks of technological processes of filling and unloading at gas stations in the Russian Federation], *Modern Science*, no. 1-1, pp. 418-427.

Bagdasaryan, A.A. (2020) Osnovnye ekologicheskie problemy Severnogo morskogo puti v perspektive ego razvitiya [The main environmental problems of the Northern Sea Route in the future of its development], *Rossiyskaya Arktika* [The Russian Arctic], no. 9, pp. 17-29.

Baev, A.A., Safronova, I.G. (2024) Analiz ekologicheskogo sostoyaniya avtozapravochnykh stantsij [Analysis of the ecological condition of gas stations], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], no. 109-13, pp. 14-17.

Belekova, A.T. (2021) Strategii upravleniya ob"ektami vseмирного prirodnogo naslediya YuNESKO, opyt Rossii [UNESCO World Natural Heritage Management Strategies: Russian experience], *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan, Otdelenie obshchestvennykh nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Department of Social Sciences], no. 1(262), pp. 21-28.

Garmonov, K.V., Zherlykina, M.N., Makarov, A.R., Zherlitsina, A.S. (2022) Obosnovanie meropriyatij po povysheniyu ekologicheskoy bezopasnosti gorodskikh avtozapravochnykh stantsij [Justification of measures to improve the environmental safety of urban gas stations], *Zhilishchnoe khozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura* [Housing and communal infrastructure], no. 2(21), pp. 96-105.

Egorov, V.V., Friedland, V.M., Ivanova, E.N. et al. (1977) *Klassifikaciya i diagnostika pochv SSSR* [Classification and diagnosis of soils of the USSR], Moscow, Kolos, 223 p.

El'chinina, O.A., Kuznetsova, O.V., Chichinova, G.V., Dement'eva, O.K., Kudachinova, A.A. (2021) *Vliyanie turistsko-rekreatsionnoj deyatel'nosti na fizicheskie svoystva pochv pribrezhnoj territorii Teletskogo ozera* [The influence of tourist and recreational activities on the physical properties of soils in the coastal area of Lake Teletskoye], v sbornike: Nauchnyj vestnik Gorno-Altajskogo gosudarstvennogo universiteta, sbornik statej, otvetstvennyj redaktor M.G. Sukhova, Gorno-Altajskij gosudarstvennyj universitet, Gorno-Altajsk, pp. 26-34.

Eres'ko, M.A., Klebanovich, N.V. (2023) Pokazateli fizicheskikh svoystv pochv dlya kompleksnoj ekologicheskoy otsenki sostoyaniya pochvennogo pokrova [Indicators of physical properties of soils for a comprehensive environmental

assessment of the state of the soil cover], *Zemlya Belarusi* [The Land of Belarus], no. 3, pp. 44-52.

Zhabbarov, Z.A., Atoeva, G.R., Sajitov, S.S. (2021) Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami vokrug poligona tverdykh bytovykh otkhodov goroda Tashkenta [Soil pollution with heavy metals around the Tashkent municipal solid waste landfill], *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki* [Scientific review. Biological sciences], no. 2, pp. 17-23.

Kolomeets, S.D. (2022) Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya dizel'nykh elektrostantsij [Improving the efficiency of diesel power plants], *Matritsa nauchnogo poznaniya* [The matrix of scientific knowledge], no. 3-1, pp. 45-49.

Majorova, Yu.A., Pashchuk, E.V., Smoktal', N.N. (2020) Sposoby snizheniya potrebleniya topliva dizel'nyimi elektrostantsiyami [Ways to reduce fuel consumption by diesel power plants], *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, [Power plants and technologies] vol. 6, no. 2, pp. 77-87.

Mezhlumyan, M.Z., Stepkina, A.V., Krikun, K.S. (2024) Prioritetnye natsional'nye proekty v Rossijskoj Federatsii, klyuchevye tseli i ozhidaemye rezul'taty [Priority national projects in the Russian Federation: key objectives and expected results], *Regional'naya i otraslevaya ekonomika* [Regional and sectoral economics], no.1, pp. 135-141.

Merzlyakova, A.S., Okolelova, A.A., Zaikina, V.N., Pasikova, A.V. (2017) Izmenenie svojstv neftezagryaznennykh pochv [Changes in the properties of oily soils], *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya* [News of universities. Applied Chemistry and Biotechnology], no. 2, pp. 173-180.

Myasoedov, Yu.V., Savchenko, D.A. (2022) Povyshenie nadezhnosti i kachestva elektrosnabzheniya territorial'no izolirovannykh rajonov putem perevoda dizel'nykh elektrostantsij v gibridnye [Improving the reliability and quality of electricity supply in geographically isolated areas by converting diesel power plants to hybrid ones], *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Estestvennye i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences], no. 97, pp. 97-101.

Pavlova, L.V., Vaniev, A.Yu. (2022) Vliyanie transportnykh sredstv i avtozapravochnykh stantsij na zdorov'e i ekologiyu [The impact of vehicles and gas stations on health and the environment], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], no. 86-8, pp. 132-135.

Popova, L.F., Andreeva, Yu.I., Nikitina, M.V. (2016) Ocenka urovnya zagryazneniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova ostrova Bol'shoj Soloveckij tyazhelymi metallami [Assessment of the level of pollution of the soil and vegetation cover of Bolshoy Solovetsky Island with heavy metals], *Principy ekologii* [Principles of Ecology], no. 2. pp 62-69, doi: 10.15393/j1.art.2016.5002.

Rasulov, O.U., Karimov, B.Yu., Zoirov, F.B., Khalifaev, F.A. (2021) Analiz zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami v usloviyakh sil'nogo zagryazneniya

promyshlennykh zon [Analysis of soil contamination with heavy metals in highly polluted industrial areas], *Politekhnikeskij vestnik. Seriya, Inzhenernye issledovaniya* [Polytechnic Bulletin, Series, Engineering Research], no. 3(55), pp. 53-57.

Sukiasyan, A.R., Kirakosyan, A.A. (2020) Zagryaznenie tyazhelymi metallami rechnoj vody i pribrezhnoj pochvy, blizlezhashchikh k territorii khvostokhranilishcha [Heavy metal pollution of river water and coastal soil adjacent to the tailings storage area], *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], no. 3(83), pp. 79-84.

Frolova, M.A., Morozova, M.V., Garamov, G.A., Ajzenshtadt, A.M. (2024) Otsenka antropogennogo vozdeystviya na territoriyu poselka Colovetskij (Colovetskij arhipelag, Arkhangel'skaya oblast') [Assessment of anthropogenic impact on the territory of the village of Solovetsky (Solovetsky archipelago, Arkhangelsk region)], *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction], no. 12, pp. 55-61.

Tsvetkov, A.Yu. (2020) Transportno-infrastrukturnye osnovy strategii razvitiya turizma v arkhangel'skoj oblasti [Transport and infrastructure foundations of the tourism development strategy in the Arkhangelsk region], *Arktika i Sever* [The Arctic and the North], no. 38, pp. 44-55.

Sharkova, S.Yu. (2011) Izmenenie himicheskikh harakteristik pochvy pod dejstviem neftezagryazneni [Change in soil chemical characteristics due to oil pollution], *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni V. G. Belinskogo* [News of the Penza State Pedagogical University named after V. G. Belinsky], no. 25, pp. 610-613

Shatalov, P.V., Podkopaeva, A.L. (2020) Pererabotka otkhodov, kak reshenie global'noj ekologicheskoy problemy v mire [Waste recycling as a solution to the global environmental problem in the world], *Innovatsii, tekhnologii i biznes* [Innovation, technology and business], no. 1 (7), pp. 97-101.

Liu, H., Chang, J., Zhao, F., Shen, L., Yang, K., Chen, L. (2025) Impact of urban expansion on soil heavy metal pollution. A comparison of new and old urban blocks, *Ecological Frontiers*, doi.org/10.1016/j.ecofro.2025.05.020.

Mor, S., Ravindra, K. (2023) Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries. Environmental impacts, challenges and sustainable management practices, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 174, pp. 510-530.

Sondh, S., Upadhyay, D.S., Patel, S., Patel, R.N. (2022) A strategic review on Municipal Solid Waste (living solid waste) management system focusing on policies, selection criteria and techniques for waste-to-value, *Journal of Cleaner Production*, p. 131908.

Tan, S., Zhang, T., Yang, Z. (2024) Vertical distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s pollution in a sediment profile from Bohai Sea, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 209, p. 117089, doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117089.

---

Wang, S., Liu, H., Rinaldi, M., Tsang, Y.P. (2025) Evaluating the impact of air corridors on the environment and public interests, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 143, p. 104732, doi.org/10.1016/j.trd.2025.104732.

Yaashikaa, P.R., Kumar, P.S., Nhung, T.C., Hemavathy, R.V., Jawahar, M.J., Neshanthini, J.P., Rangasamy, G. (2022) A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis, *Chemosphere*, vol. 309, p. 1, Art. 136627, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136627.

Yu, Li, Yixi, Cuomu, Yiming, Gao, Guoqin, Lv, Weiwei, Lin, Sirui, Li. (2024) Study on green power supply modes for heavy load in remote areas, *Global Energy Interconnection*, vol. 7.I.4, pp. 475-485, doi.org/10.1016/j.gloi.2024.08.011.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.10.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 28.01.2026.

### **Для цитирования / For citation:**

Морозова, М.В., Фролова, М.А., Айзенштадт, А.М., Тарасенко, А.А., Жеребцов, А.А. (2026) Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова острова Большой Соловецкий, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 46-65, doi: 10.21513/0207-2564-2026-1-2-46-65.

Morozova, M.V., Frolova, M.A., Ayzenshtadt, A.M., Tarasenko, A.A., Zhrebtssov, A.A. (2026) Assessment of the level of heavy metal contamination of the soil cover of Bolshoy Solovetsky Island, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*. vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 46-65, doi: 10.21513/0207-2564-2026-1-2-46-65.

## **Динамика концентрации CO<sub>2</sub> по данным самолетных наблюдений над Центральной Якутией за 2018-2020 гг.**

*А.В. Алексеева<sup>1)\*</sup>, М.Р. Григорьев<sup>2)</sup>, Е.В. Старостин<sup>1)</sup>, Р.Е. Петров<sup>2)</sup>,  
П.Г. Мордовской<sup>1)</sup>, Т.Х. Максимов<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>ФИЦ Якутский научный центр СО РАН,  
Россия, 677980, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Петровского, 2

<sup>2)</sup>ИБПК СО РАН,  
Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 41

Адрес для переписки: \*aav1312@mail.ru

**Реферат.** Мониторинг концентрации углекислого газа в приземном слое атмосферы является актуальной задачей в условиях глобальных климатических изменений по причине взаимосвязи роста температуры и концентрации CO<sub>2</sub>. В данной статье представлены результаты анализа сезонных колебаний, вертикального распределения и динамики одержания углекислого газа над Центральной Якутией.

Исследуемый регион, с его обширной многолетней мерзлотой и типичным бореальным таежным лесом, является важным звеном для понимания динамики изменений углеродного цикла Северо-Востока России. Деградация мерзлотных экосистем в условиях потепления может привести к эмиссии накопленного углерода.

Отбор образцов воздуха проводился на разных высотах от 100 м до 3000 м с частотой один раз в месяц в дневное время над лесной научной станцией «Спасская Падь». Результаты трехлетнего анализа отражают сезонные колебания концентрации CO<sub>2</sub>, его распределение на исследуемых высотах в планетарном пограничном слое атмосферы над территорией Центральной Якутией. В работе выявлено, что в холодный продолжительный период наблюдается накопление содержания углекислого газа в атмосфере и значительное снижение значений в теплый сезон, максимальные средние значения концентрации регистрируются в феврале-марте, а минимальные в июне-июле. При этом в зимние месяцы отмечается относительно равномерное распределение концентрации CO<sub>2</sub> на разных высотах, в отличие от летних месяцев, когда регистрируются значительные отклонения в показателях концентраций. Динамика концентрации углекислого газа демонстрирует постепенный рост содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере, наблюдается ежегодный рост средних значений концентрации как в холодный, так и в теплый период времени года.

---

Полученная количественная характеристика сезонной динамики концентрации  $\text{CO}_2$  и выявленная направленность изменений могут дополнить понимание ее пространственно-временной изменчивости в различных климатических регионах России. Исследование также позволяет выявить особенности содержания углекислого газа в мерзлотных экосистемах, что имеет важное значение для адекватной оценки влияния изменений климата.

**Ключевые слова.** Атмосфера, концентрация  $\text{CO}_2$ , углекислый газ, Сибирь, Якутия, многолетняя мерзлота, мерзлотные экосистемы, самолетные наблюдения.

## **Dynamics of $\text{CO}_2$ concentration: Aircraft measurements over Central Yakutia during (2018-2020)**

*A.V. Alekseeva<sup>1)\*</sup>, M.R. Grigoryev<sup>2)</sup>, E.V. Starostin<sup>1)</sup>, R.E. Petrov<sup>2)</sup>,  
P.G. Mordovskoy<sup>1)</sup>, T.Ch. Maximov<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Federal Research Center “Yakut Scientific Center SB RAS”,  
2, Petrovskogo str., 677980, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

<sup>2)</sup>IBPC SB RAS,  
41, Lenin ave., 677000, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation

Correspondence address: *\*aav1312@mail.ru*

**Abstract.** Monitoring carbon dioxide concentrations in the near-surface atmospheric layer is a current task in the context of global climate change, due to the interrelationship between rising temperatures and  $\text{CO}_2$  levels. This article presents the results of an analysis of seasonal fluctuations in carbon dioxide content, its vertical distribution, and temporal dynamics over Central Yakutia.

The studied region, with its extensive permafrost and typical boreal taiga forest, is an important link for understanding the dynamics of changes in the carbon cycle of northeastern Russia. The degradation of permafrost ecosystems under warming conditions may lead to the emission of accumulated carbon dioxide.

The study region, with its extensive permafrost and typical boreal taiga forest, is an important area for understanding the dynamics of the carbon cycle in northeastern Russia. The degradation of permafrost soils under warming conditions can lead to the emission of accumulated carbon.

Air samples were collected at various altitudes, from 100 m to 3000 m, once a month during daylight hours above the scientific forest station Spasskaya Pad. The results of a three-year analysis reflect seasonal fluctuations in  $\text{CO}_2$  concentration and its distribution at the different heights within the planetary boundary layer over Central Yakutia. The study found that during the long cold period, there is an accumulation of carbon dioxide in the atmosphere, with a significant decrease in values during the warm season. Maximum average concentrations are recorded in February-March, while minimum values are observed in June-July. In winter months, the  $\text{CO}_2$  concentration is distributed relatively evenly across different

---

altitudes. In contrast to summer months, when significant deviations in concentration levels are observed. The dynamics of carbon dioxide concentration demonstrate a gradual increase in atmospheric CO<sub>2</sub>, with an annual rise in average values observed in both the cold and warm periods of the year.

The obtained quantitative characteristics of the seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> concentration and the rate of its increase can contribute to a better understanding of changes in carbon dioxide concentration across various climatic regions of Russia. The study also reveals specific features of carbon dioxide content in permafrost ecosystems, which is crucial for an adequate assessment of the impact of climate change.

**Keywords.** Atmosphere, CO<sub>2</sub> concentration, carbon dioxide, Siberia, Yakutia, permafrost ecosystems, aircraft monitoring.

## Введение

Атмосферный углекислый газ (CO<sub>2</sub>) вносит основной вклад в парниковый эффект, который приводит к глобальному изменению климата. Глобальное потепление влечет за собой негативные последствия для жизни человека и экологических систем различного масштаба. Связь между ростом концентрации диоксида углерода в атмосфере и ростом глобальной приземной температуры подробно представлена в Шестом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, где подтверждается вывод о том, что существует зависимость между выбросами CO<sub>2</sub> и вызываемым ими глобальным потеплением. Согласно оценкам экспертов, каждая 1000 Гт CO<sub>2</sub> кумулятивных выбросов диоксида углерода вызывает повышение глобальной приземной температуры на 0.27-0.63°C (IPCC, 2021).

С началом промышленной деятельности человека и развитием экономики отмечается быстрый рост содержания диоксида углерода в атмосфере. Рост приземной температуры влечет за собой изменения биологических сообществ, повышение уровня моря и природные катастрофы, влияя на устойчивость природных и антропогенных систем. Источники эмиссий парниковых газов, вызванных деятельностью человека, связаны с добычей, перевозкой и использованием ископаемого топлива, промышленным производством, сельским хозяйством, а также трансформацией земельных ресурсов.

Сокращение эмиссий парниковых газов, в первую очередь углекислого газа, стало глобальным приоритетом, страны заключили международные соглашения о достижении углеродной нейтральности и внедряют низкоуглеродные технологии в промышленности, тем не менее среднемировая концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере продолжает увеличиваться. По данным Всемирной метеорологической организации по парниковым газам значение в 2023 году достигло 420 ppm, что на 42.9 ppm больше, чем 20 лет назад, и на 51% больше, чем концентрация диоксида углерода в доиндустриальный период (The WMO Global Atmosphere Watch Greenhouse Gas Bulletin, 2024).

Средняя температура в России за последние десятилетия растет значительно быстрее, чем в среднем по планете, потепление в России составило

около  $+2.5^{\circ}\text{C}$ , а в Арктических регионах еще выше – аномалия достигла  $4...+6^{\circ}\text{C}$ , ускоряя таяние льдов и многолетней мерзлоты (Росгидромет, 2022).

Якутия, как территория сплошной многолетней мерзлоты с особыми климатическими условиями представляет собой масштабный регион для проведения исследовательских работ, направленных на мониторинг и анализ динамики концентрации углекислого газа в атмосфере. Изменения климата существенно повлияли на среднегодовые температуры воздуха, количество осадков, длительность сезонов года и глубину сезонного протаивания почв (Десяткин, 2018). Повышение среднегодовой температуры воздуха способно вызвать активизацию биохимических процессов в почвах криолитозоны (Максимов, 2007).

Район исследования характеризуется преобладанием бореальных среднетаежных, преимущественно лиственничных брусничных лесов. В Центральной Якутии средняя годовая температура воздуха составляет  $-10.3^{\circ}\text{C}$  при средней многолетней температуре самого холодного месяца  $-43...-45^{\circ}\text{C}$  и самого теплого месяца  $18-19^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность теплого периода (выше  $0^{\circ}\text{C}$ ) составляет 140 дней. Осадков выпадает 200-220 мм, из них на теплый период (май-сентябрь) приходится 70-75% годовой суммы. Рассматриваемая территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, у которых фоновые значения средних годовых температур равны  $-1.5...-3^{\circ}\text{C}$  (Петров, Федоров, 2023).

На научной лесной станции «Спасская Падь» (Центральная Якутия) в течение более 25 лет осуществляется наземный мониторинг за тенденциями изменений концентрации парниковых газов, а также проводятся исследования особенностей углеродного газообмена экосистем криолитозоны (Максимов, 2023), процесса фотосинтеза (Григорьев и др., 2023), концентрации черного углерода в атмосфере (Мордовской и др., 2024), изучения характеристик репрезентативных экосистем (Петров, Федоров, 2023), содержания углерода в почвах (Шепелев и др., 2024), углеродного и водного циклов лесных экосистем мерзлотных экосистем (Кононов и др., 2018) и другие междисциплинарные научные исследования по решению фундаментальных вопросов.

Самолетные исследования над станцией «Спасская Падь» были введены в рамках проекта JR-Station (Belikov et al., 2019) с целью понимания вертикального распределения  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Наблюдательная сеть мониторинга парниковых газов была установлена на девяти объектах, восемь пунктов расположены в Западной Сибири и один – в Центральной Якутии на станции «Спасская Падь» (Sasakawa et al., 2024). Реализация проекта обусловлена значимостью проблемы изменения климата и необходимостью определения вклада региона в глобальный углеродный баланс. В последующих работах может быть расширен анализ более продолжительного ряда данных самолетных исследований для определения взаимосвязи с наземными наблюдениями и влияния локальных факторов на эмиссию  $\text{CO}_2$ .

## Методы исследования

Самолетные исследования для сбора образцов воздуха на легком многоцелевом самолете проводились над лесной научной станцией «Спасская Падь», Центральная Якутия (рис. 1). Пробы воздуха отбирались на высотах 100 м, 500 м, 1000 м, 2000 м, 3000 м один раз в месяц с 13:00 до 15:00 по местному времени. Дневное время, когда интенсивность фотосинтеза находится в максимуме, а нижние слои тропосферы хорошо перемешаны соответствует методике исследований вертикального распределения  $\text{CO}_2$  над югом Западной Сибири (Аршинов и др., 2018). Высоты для исследования выбраны исходя из предположения, что концентрация диоксида углерода на высоте до 500 м отражает действие локальных источников и стоков  $\text{CO}_2$ , в то время как на уровне 2000-3000 м преобладают фоновые концентрации, обусловленные глобальными атмосферными процессами. Использование расчета усредненных данных измерений, проведенных в дневное время, позволяет исключить завышение средних значений концентрации  $\text{CO}_2$ , связанное с его накоплением в устойчивом пограничном слое при инверсии температуры (Тимохина и др., 2018).



**Рисунок 1.** Лесная научная станция «Спасская падь» с высоты полета

**Picture 1.** Spasskaya Pad forest research station, the view from the aircraft

Для отбора проб атмосферного воздуха использовался самодельный мобильный прибор для сбора образцов воздуха (рис. 2). Прибор состоит из следующих компонентов: поршневой насос КР-М330 (ElectroCraft, США) с компрессором MB-158 (IBS Company LTD., Япония); клапан противодавления, поддерживающий постоянный расход воздуха на уровне на уровне 0.8 л/мин; аналоговый манометр (Takashima Keiki, Япония) со шкалой 0-0.6 МПа для визуального контроля давления. Электропитание прибора обеспечивается через преобразователь напряжения (PowerTite, Япония) и трансформатор (Toyouzumi Dengenkik, Япония).

Пробы воздуха отбирались на указанных высотах в лабораторные стеклянные колбы с двойным клапаном (рис. 2), объемом 2 л, которые предварительно продувались через поршневой насос около одной минуты, а затем заполнялись воздухом через кабель, пропущенный к крылу самолета.

Образцы воздуха после отбора отправлялись авиатранспортом из Якутии в Японию в пластиковом противоударном контейнере. Анализ проводился в Национальном институте экологических исследований (National Institute for Environmental Studies, NIES) на газовом хроматографе GC-8A, Shimadzu (Япония) по методологии (Machida et al., 2008), разработанной для авиационных измерений. Калибровка хроматографа проводилась по двум стандартным газовым смесям, сертифицированными NIES. Диапазоны измерений и погрешности определения концентрации  $\text{CO}_2$  составили 380-426 ppm  $\pm 0.1$  ppm (погрешность газохроматографического анализа).

Основным источником погрешности является неопределенность, связанная с транспортировкой проб из удаленного региона. Учитывая этот фактор, общая погрешность измерений оценивается как существенно превышающая инструментальную  $\pm 0.1$  ppm, что следует рассматривать как ограничение.



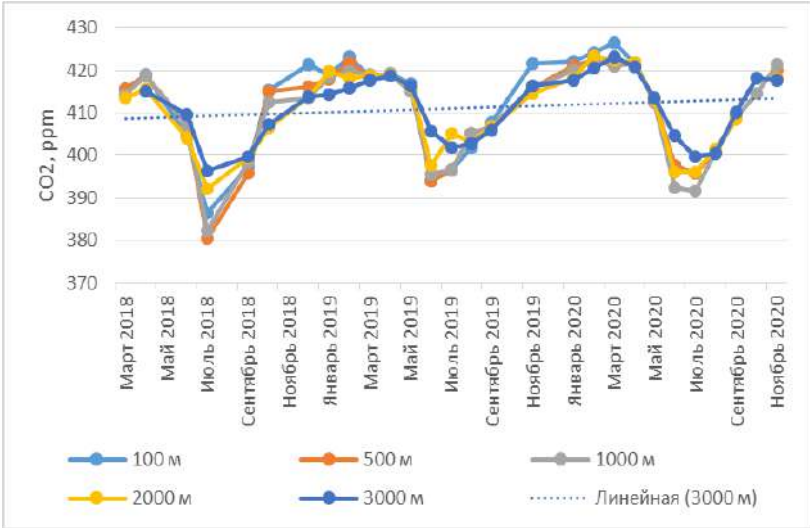
**Рисунок 2.** Поршневой насос и стеклянные колбы

**Picture 2.** Air pump and glass bottles for air samples

## Результаты

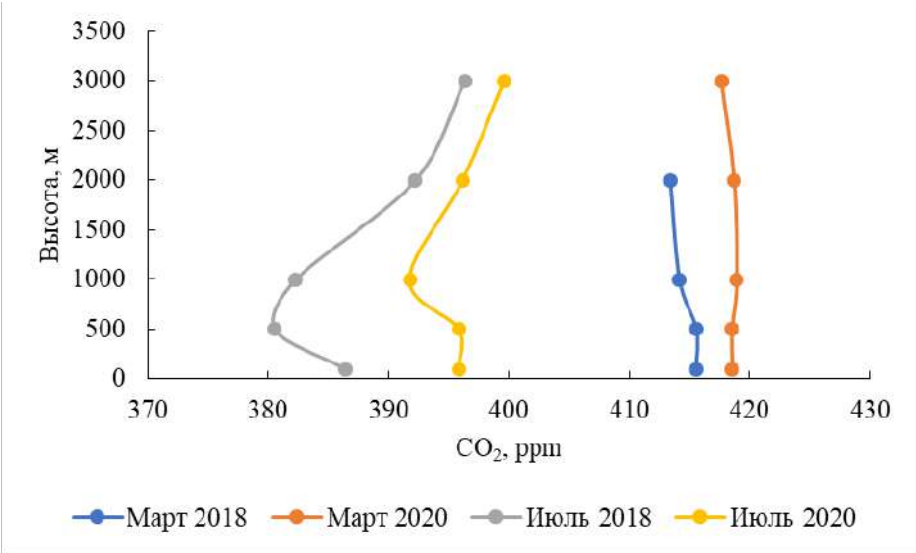
Результаты измерений содержания диоксида углерода в пограничном слое атмосферы на разных высотах за 2018-2020 гг. над научной лесной станцией «Спасская Падь» приведены на рис. 3. На графике средних значений концентрации  $\text{CO}_2$  в эти годы отчетливо наблюдается сезонный цикл: повышение в холодный период и снижение в теплый. В большинстве случаев средние значе-

ния концентрации  $\text{CO}_2$  несколько выше на меньших высотах (100 м, 500 м), чем на больших (2000 м, 3000 м), кроме летних месяцев июнь и июль (рис. 4). Однако, эта разница не всегда значительна, иногда наблюдаются отклонения.



**Рисунок 3.** Изменение концентрации диоксида углерода на разных высотах над Центральной Якутией

**Figure 3.** Changes in carbon dioxide concentration at different altitudes over Central Yakutia

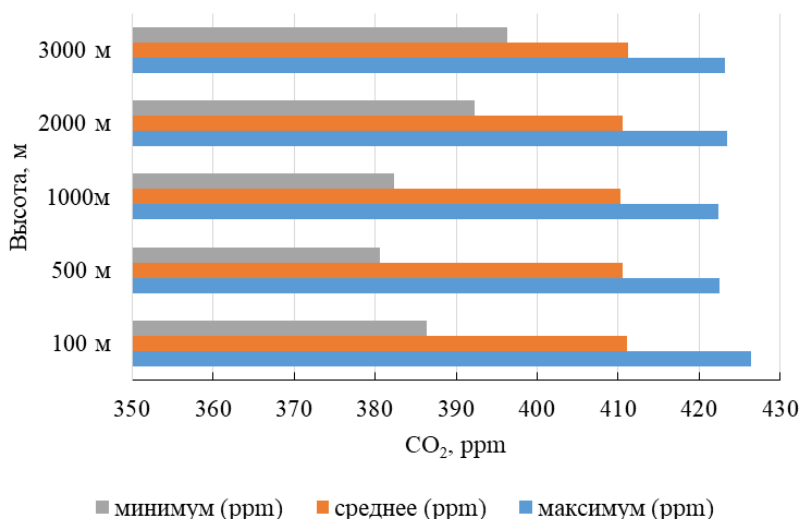


**Рисунок 4.** Изменчивость концентрации  $\text{CO}_2$  на разных высотах в холодный и теплый периоды

**Figure 4.** Variability of  $\text{CO}_2$  concentration at different altitudes during cold and warm periods

На рис. 5 представлены минимумы и максимумы средних значений концентрации вертикального распределения диоксида углерода, по данным самолетных измерений, на разных высотах в период за 2018-2020 гг. В указанный

период наибольшая изменчивость средних значений концентрации диоксида углерода наблюдается на высоте 500 м, размах составляет 41.9 ppm, наименьшая разница отмечается на высоте 3000 м и составляет 26.7 ppm. В масштабах всех исследуемых высот наибольшая изменчивость концентрации диоксида углерода на высотах 100 м и 500 м указывает на сильное влияние локальных источников (почва, растительность). На высоте 2000-3000 м отмечаются более стабильные значения. Наименьшее значение зафиксировано на высоте 500 м в июле 2018 года и составило 380.6 ppm, также июль указанного года отмечает минимумы на всех высотах за исследуемый трехлетний период. Наибольшее значение 426.4 ppm зарегистрировано на высоте 100 м в марте 2020 г.



**Рисунок 5.** Минимумы и максимумы концентраций CO<sub>2</sub> на каждой высоте за 2018-2020 гг.

**Figure 5.** Minimum and maximum CO<sub>2</sub> concentrations (ppm) at each altitude (2018-2020)

## Обсуждение результатов

Исследование выявило, что в Центральной Якутии концентрация диоксида углерода в приземном слое атмосферы за исследуемый период возрастает. Анализ полученных данных за трехлетний период позволил получить предварительную оценку величины изменения средних значений концентрации CO<sub>2</sub> всех высот, которая составила 2.6 ppm в год. Эта тенденция согласуется с данными, полученными над территорией Западной Сибири. Самолетные исследования Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск) выявили положительный тренд роста концентрации CO<sub>2</sub>, за период 2009-2018 гг. на обсерватории «Фоновая» (56°25' с.ш., 84°04' в.д.) зафиксирован рост концентрации со значением 2.28 ppm в год (Антохина и др., 2019). Данные, полученные на обсерватории Мауна-Лоа (19°32' с.ш., 155°35' в.д.) и опубликованные в открытых источниках (GML NOAA) также демонстрируют устойчивый рост содержания углекислого газа в атмосфере и за период 2018-2020 гг. рост CO<sub>2</sub> составил 2.75 ppm в год. Эти результаты

подтверждают глобальную тенденцию устойчивого роста концентрации углекислого газа.

Измерения, полученные на обсерватории Мауна-Лоа, используются для сопоставительного анализа, поскольку приняты в научном сообществе достоверными и ориентировочными (Тимохина и др., 2015). Ниже в табл. 1 отражены максимальные значения концентрации диоксида углерода в зимний и летний периоды по данным самолетных измерений над станцией «Спасская падь» в сравнении с данными обсерватории Мауна-Лоа (данные: Esrf.noaa.gov). Для сравнения выбрана высота 3000 м над лесной научной станцией «Спасская падь» в связи с тем, что обсерватория Мауна-Лоа расположена на высоте 3394 м над уровнем моря, а также высота метеорологической вышки 34 м. Такой подход позволяет минимизировать влияние различий в высотном положении станций на результаты анализа концентрации CO<sub>2</sub>.

**Таблица 1.** Максимальные концентрации средних значений CO<sub>2</sub>  
в исследуемый период 2018-2020

**Table 1.** Maximum values of mean CO<sub>2</sub> concentrations observed during the study period  
from 2018 to 2020

|              | CO <sub>2</sub> (ppm)                     |                  | CO <sub>2</sub> (ppm)<br>Обсерватория Мауна Лоа |
|--------------|-------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------|
|              | Станция «Спасская падь»<br>На высоте 34 м | На высоте 3000 м |                                                 |
| Июнь 2018    | 394.9                                     | 409.72           | 410.99                                          |
| Июнь 2019    | 397.84                                    | 405.8            | 414.15                                          |
| Июнь 2020    | 394.89                                    | 404.62           | 416.58                                          |
| Декабрь 2018 | 419.45                                    | 413.7            | 409.27                                          |
| Ноябрь 2019  | 423.34                                    | 416.35           | 410.47                                          |
| Ноябрь 2020  | 421.6                                     | 417.78           | 413.1                                           |

Концентрации диоксида углерода по данным станции «Спасская падь» и обсерватории Мауна-Лоа демонстрируют заметные различия в максимальных концентрациях. В летний период в Якутии максимальные концентрации ниже, чем значения концентрации углекислого газа в этот же календарный месяц над Мауна Лоа. В зимний период над Центральной Якутией, напротив, фиксируются более высокие значения, что может быть связано с эмиссией промышленных центров, инверсией температур и низкой ветреной активностью в рассматриваемый период.

В Якутии в холодный продолжительный период, наблюдается накопление диоксида углерода на всех высотах с октября по март, пиковые средние значения достигаются в феврале-марте. Летом наблюдается резкий спад средних значений концентрации диоксида углерода на каждой высоте, минимальные значения зафиксированы на высоте 34 м (табл. 1), что связано с вегетационным периодом лесов и продолжительностью светового дня (Максимов, 2007). В летний период отмечается высокая изменчивость атмосферного содержания CO<sub>2</sub> на различных высотах, также, как и в пунктах сети

мониторинга на территории Западной Сибири (Антонович и др., 2022). Соответственно в холодный сезон, когда отсутствует естественный сток  $\text{CO}_2$ , и преобладает антициклональный режим погоды, отмечается сглаженный ход концентрации  $\text{CO}_2$  и более плавный длительный период. Начало периода снижения концентрации диоксида углерода фиксируется в апреле-мае и продолжается до июля, когда достигается минимум. В августе уже отмечается обратный рост концентрации.

Вертикальное распределение концентрации диоксида над исследуемым регионом демонстрирует большую изменчивость на нижних высотах особенно в летний сезон, что может указывать на влияние локальных факторов. На высоте 2000-3000 м наблюдаются более стабильные значения концентрации диоксида углерода.

## Заключение

В статье представлены данные, накопленные за 2018-2020 годы самолетных наблюдений вертикального распределения диоксида углерода в Центральной Якутии. На их основе определены вертикальные профили распределения  $\text{CO}_2$  и выявлена направленность вариаций его концентрации над исследуемым регионом. Проведенные исследования выявили тенденцию к росту концентрации углекислого газа в исследуемом регионе, расчетная величина составила 2.6 ppm в год. За трехлетний период максимальное среднее значение содержания  $\text{CO}_2$  достигло 426 ppm в марте 2020 года на высоте 100 м, а минимальное – 380 ppm на высоте 500 м в июле 2018 года. Сезонные колебания демонстрируют выраженную динамику: максимальные средние значения наблюдаются в зимний период, минимальные фиксируются в летний сезон. Полученные результаты показывают, что локальные факторы имеют влияние на высотах до 500 м, а на высотах 2000-3000 м концентрации более стабильны. Проведенные самолетные исследования позволили количественно проследить динамику содержания углекислого газа в атмосфере и расширить понимание региональных особенностей криолитозоны Якутии. Значимость данных исследований состоит в формировании комплексной картины о роли обширных репрезентативных лесных экосистем криолитозоны в условиях глобального потепления и изучении влияния климатических изменений на их целостность.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема № 124102500817-7.*

## Список литературы

Антонович, В.В., Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Дудорова, Н.В., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Максютков, Ш.Ш., Мачида, Т., Пестунов, Д.А., Пташник, И.В., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, М., Симоненков, Д.В.,

Складнева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А. В. (2022) Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Часть 2, *Системы контроля окружающей среды*, № 4 (50), с. 61-69, URL: <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-4-61-69>.

Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Дудорова, Н.В., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Краснов, О.А., Максюттов, Ш.Ш., Мачида, Т., Панченко, М.В., Пестунов, Д.А., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, М., Симоненков, Д.В., Складнева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А.В. (2019) Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири, *Оптика атмосферы и океана*, № 9, с. 777-785.

Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Давыдов, Д.К., Краснов, О.А., Maksutov, Sh., Machida, T., Sasakawa, M., Фофонов, А.В. (2018) Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период, *Оптика атмосферы и океана*, № 8, с. 670-681.

Григорьев, М.Р., Максимов, Т.Х., Максимов, А.П. (2023) Эколого-физиологические особенности процесса фотосинтеза берёзы плосколистной (*Betula platyphylla*) в Якутии, *X Съезд общества физиологов растений России "Биология растений в эпоху глобальных изменений климата"*, Всероссийская научная конференция с международным участием, тезисы докладов, Уфа, с. 120.

Десяткин, Р.В. (2018) Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны Северного полушария, *Вестник Российской Академии наук*, № 88(12), с. 1113-1121, URL: <https://doi.org/10.31857/S086958730003190-7>.

Кононов, А.В., Максимов, А.П., Петров, Р.Е., Терентьева, М.П. (2018) Особенности углеродного и водного циклов лесных экосистем криолитозоны в контексте глобального изменения климата, *Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды, Сборник материалов Годичного собрания Общества физиологов растений России Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых*, с. 492-495, URL: <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-492-495>.

Максимов, Т.Х. (2007) *Круговорот углерода в лиственничных лесах якутского сектора криолитозоны*, автореферат на соискание ученой степени доктора биологических наук, Институт леса им. В. Н. Сукачева, Красноярск, 324 с.

Максимов, Т.Х. (2023) Особенности углеродного газообмена экосистем криолитозоны в контексте глобального изменения климата, *X Съезд общества физиологов растений России "Биология растений в эпоху глобальных изменений климата"*, Уфа, с. 231-231, URL: <https://doi.org/10.31163/978-5-6047532-1-7>.

Мордовской, П.Г., Максимов, Т.Х., Григорьев, М.Р., Старостин, Е.В., Неустроев, А.А. (2024) Влияние повышенных концентраций черного углерода в атмосфере на фотосинтез в листьях березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) в Центральной Якутии, *Биосфера*, т. 16. № 1, с. 30-35.

Петров, М.И., Федоров, А.Н. (2023) Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии, *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, № 28 (2), с. 248-260, <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260>.

Росгидромет (2022) *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, URL: [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/compressed.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf) (дата обращения: 14.01.2025).

Тимохина, А.В., Прокушкин, А.С., Панов, А.В., Колосов, Р.А., Сиденко, Н.В., Лаврич, Й., Хайманн, М. (2018) Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода в атмосфере над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009-2015 гг.), *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 20-28.

Тимохина, А.В., Прокушкин, А.С., Онучин, А.А., Панов, А.В., Кофман, Г.Б., Верховец, С.В., Хайманн, М. (2015) Многолетний тренд концентрации CO<sub>2</sub> в приземной атмосфере над Центральной Сибирью, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 58-64.

Шепелев, А.Г., Григорьев, М.Р., Черепанова, А.М., Максимов, Т.Х. Федоров, А.Н. (2024) Анализ запасов углерода в подстилке и почве Приленского плато, *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, т. 29, № 3, с. 397-407, URL: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Sasakawa, M., Machida, T., Davydov, D., Fofonov, A. (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at tower network in Siberia from 2005 to 2016, *Atmosphere*, no. 10(11), pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

IPCC (2021) *Climate change 2021: The physical science basis [Report]*, URL: [https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM-Russian.pdf](https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM-Russian.pdf) (accessed 14.01.2025).

Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirokuni, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., Ogawa, T. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> and other trace gas species using commercial airlines, *Atmospheric and Oceanic Technology*, no. 25(10), pp. 1744-1754, URL: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>.

Sasakawa, M., Tsuda, N., Machida, T., Arshinov, M., Davydov, D. (2024) Working standard gas saving system for in-situ CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurements and calculation method for concentrations and their uncertainty, *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 17, pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2023-246>.

## References

Antonovich, V.V., Antohina, O.Yu., Antohin, P.N., Arshinova, V.G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Maksyutov, Sh.Sh., Machida, T., Pestunov, D.A., Ptashnik, I.V., Rasskazchikova, T.M., Savkin, 77D.E., Sasakawa, M., Simonenkov, D.V.,

Sklyadneva, T.K., Tolmachev, G.N., Fofonov, A.V. (2022) Karbonovye poligony IOA SO RAN dlya issledovaniya dinamiki parnikovyh gazov v atmosfere. Chast' 2 [Carbon landfills of the IAA SB RAS for the study of greenhouse gas dynamics in the atmosphere. Part 2], *Sistemy kontrolya okruzhayushchej*, no. 4 (50), pp. 61-69, doi: 10/33075/2220-5861-2022-4-61-69.

Antohina, O.Yu., Antohin, P.N., Arshinova, V.G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Dudorova, N.V., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Krasnov, O.A., Maksyutov, Sh.Sh., Machida, T., Panchenko, M.V., Pestunov, D.A., Rasskazchikova, T.M., Savkin, D.E., Sasakawa, M., Simonenkov, D.V., Sklyadneva, T.K., Tolmachev, G.N., Fofonov, A.V. (2019) Issledovanie dinamiki koncentracii parnikovyh gazov na territorii Zapadnoj Sibiri [Study of the dynamics of greenhouse gas concentrations in Western Siberia], *Optika atmosfery i okeana*, no. 9, pp. 777-785.

Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Davydov, D.K., Krasnov, O.A., Maksyutov, Sh., Machida, T., Sasakawa, M., Fofonov, A.V. (2018) Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya uglekislogo gaza nad yugom Zapadnoj Sibiri v letnij period [Features of vertical distribution of carbon dioxide over the south of Western Siberia in summer], *Optika atmosfery i okeana*, no. 8, pp. 670-681.

Grigoryev, M.R., Maximov, T.Ch., Maksimov, A.P. (2023) Ekologo-fiziologicheskie osobennosti processa fotosinteza beryozy ploskolistnoj (*Betula platyphylla*) v Yakutii [Ecological and physiological features of photosynthesis process of flat-leaved birch (*Betula platyphylla*) in Yakutia], *X S"ezd obshchestva fiziologov rastenij Rossii "Biologiya rastenij v epohu global'nyh izmenenij klimata". Vserossiyskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem: Tezisy dokladov* [The 10<sup>th</sup> Congress of the Russian Society of Plant Physiologists, "Plant Biology in the Era of Global Climate Change." All-Russian scientific conference with international participation, abstracts of papers], Ufa, Russia, p. 120.

Desyatkin, R.V. (2018) Izmenenie klimata i dinamika merzlotnyh ekosistem centra materikovoj kriolitozony Severnogo polushariya [Climate change and dynamics of permafrost ecosystems in the center of the continental cryolithozone of the Northern Hemisphere], *Vestnik Rossijskoj Akademii nauk*, vol. 88, no. 12, pp. 1113-1121, doi: 10.31857/S086958730003190-7.

Kononov, A.V., Maksimov, A.P., Petrov, R.E., Terentyeva, M.P. (2018) Osobennosti uglernodnogo i vodnogo ciklov lesnyh ekosistem kriolitozony v kontekste global'nogo izmeneniya klimata. Mekhanizmy ustojchivosti rastenij i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy [Features of carbon and water cycles of forest ecosystems of cryolithozone in the context of global climate change. Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental conditions], *Sbornik materialov Godichnogo sobraniya Obshchestva fiziologov rastenij Rossii Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem i shkoly molodyh uchenyh, V 2-h chastyah* [Mechanisms of plant and microorganism resistance to adverse environmental conditions, Collection of materials from the Annual Meeting of the Russian Society

of Plant Physiologists, the All-Russian scientific conference with international participation and the school for young scientists], pp. 492-495, URL: <https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-492-4951>.

Maximov, T.Ch. (2007) *Krugovorot ugleroda v listvennichnyh lesah yakutskogo sektora kriolitozony* [Carbon cycle in the larch forests of the Yakut cryolithozone sector], Extended abstract of Doctor's thesis, Institut lesa im. V. N. Sukacheva, Krasnoyarsk, Russia, 324 p.

Maksimov, T.Ch. (2023) Osobennosti uglerodnogo gazoobmena ekosistem kriolitozony v kontekste global'nogo izmeneniya klimata [Features of carbon gas exchange of cryolithozone ecosystems in the context of global climate change], *X S"ezd obshchestva fiziologov rastenij Rossii "Biologiya rastenij v epohu global'nyh izmenenij klimata"* [10<sup>th</sup> Congress of the Russian Society of Plant Physiologists "Plant Biology in the Era of Global Climate Change"], Ufa, Russia, pp. 231-231, URL: <https://doi.org/10.31163/978-5-6047532-1-7>.

Mordovskoy, P.G., Maximov, T.Ch., Grigoryev, M.R., Starostin, E.V., Neustroev, A.A. (2024) Vliyanie povyshennykh koncentracij chernogo ugleroda v atmosfere na fotosintez v list'yah berezy ploskolistnoj (*Betula platyphylla* Sukacz.) v Central'noj Yakutii [Effect of elevated atmospheric black carbon concentrations on photosynthesis in leaves of flat-leaved birch (*Betula platyphylla* Sukacz.) in Central Yakutia], *Biosfera*, vol. 16, no. 1, pp. 30-35.

Petrov, M. I., Fedorov, A.N. (2023) Vliyanie klimaticheskikh uslovij na lesnye pozhary v Central'noj Yakutii [Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, vol. 28, no. 2, pp. 248-260, doi: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260.

Rosgidromet (2022) *Tretij ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii* [The third assessment report of the Russian Hydrometeorological Service on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2022), URL: [https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf\\_download/compressed.pdf](https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf), (accessed: 14.01.2025).

Timohina, A.V., Prokushkin, A.S., Panov, A.V., Kolosov, R.A., Sidenko, N.V., Lavrich, J., Hajmann, M. (2018) Mezhdunarodnaya izmenchivost' koncentracii dioksida ugleroda v atmosfere nad central'noj chast'yu Sibiri (po dannym mezhdunarodnoj observatorii ZOTTO za 2009 -2015 gg.) [Interannual variability of carbon dioxide concentration in the atmosphere over the central part of Siberia (according to the international ZOTTO Observatory for 2009-2015)], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 20-28.

Timohina, A.V., Prokushkin, A.S., Onuchin, A.A., Panov, A.V., Kofman, G.B., Verhovec, S.V., Hajmann, M. (2015) Mnogoletnij trend koncentracii CO<sub>2</sub> v prizemnoj atmosfere nad Central'noj Sibir'yu [Long-term trend of CO<sub>2</sub> concentration in the surface atmosphere over Central Siberia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 58-64.

Shepelev, A.G., Grigoryev, M.R., Cherepanova, A.M., Maximov, T.Ch., Fedorov, A.N. (2024) Analiz zapasov ugleroda v podstilke i pochve Prilenskogo plato [Analysis of carbon stocks in litter and soil of the Prilensky Plateau], *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, vol. 29, no. 3, pp. 397-407, URL: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-397-407>.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Sasakawa, M., Machida, T., Davydov, D., Fofonov, A. (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at tower network in Siberia from 2005 to 2016, *Atmosphere*, no. 10(11), pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

IPCC (2021) *Climate change 2021: The physical science basis [Report]*, URL: [https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SP-M\\_Russian.pdf](https://ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SP-M_Russian.pdf) (accessed 14.01.2025).

Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirofani, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., Ogawa, T. (2008) Worldwide measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> and other trace gas species using commercial airlines, *Atmospheric and Oceanic Technology*, no. 25(10), pp. 1744-1754, URL: <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>.

Sasakawa, M., Tsuda, N., Machida, T., Arshinov, M., Davydov, D. (2024) Working standard gas saving system for in-situ CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurements and calculation method for concentrations and their uncertainty, *Atmospheric Measurement Techniques*, no. 17, pp. 1-18, URL: <https://doi.org/10.5194/amt-2023-246>.

Статья поступила в редакцию (Received): 16.06.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 14.01.2026.

### Для цитирования / For citation:

Алексеева, А.В., Григорьев, М.Р., Старостин, Е.В., Петров, Р.Е., Мордовской, П.Г., Максимов Т.Х. (2026) Динамика концентрации СО<sub>2</sub> по данным самолетных наблюдений над Центральной Якутией за 2018-2020 гг., *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 66-80, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-66-80.

Alekseeva, A.V., Grigoryev, M.R., Starostin, E.V., Petrov, R.E., Mordovskoy, P.G., Maximov T.Ch. (2026) Dynamics of CO<sub>2</sub> concentration: Aircraft measurements over Central Yakutia during (2018-2020), *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 66-80, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-66-80.

## Использование данных измерений концентраций в воздухе и осадках для модельной оценки поступления соединений серы и азота из атмосферы в Байкальской природной территории

И.С. Ильин<sup>1)\*</sup>, Д.А. Галушин<sup>1)</sup>, С.А. Громов<sup>1,2)</sup>, Е.С. Жигачёва<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

<sup>2)</sup> Институт географии РАН, Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., 29

\*Адрес для переписки: [i.ilyin@igce.ru](mailto:i.ilyin@igce.ru)

**Резюме.** Представлены результаты расчетов и количественной оценки суммарных потоков атмосферных выпадений окисленной серы, окисленного азота и восстановленного азота на Байкальскую Природную Территорию (БПТ) с использованием данных измерений концентраций в воздухе и атмосферных осадках, и моделирования скоростей сухого осаждения для разных типов подстилающей поверхности региона. Данные измерений содержания загрязняющих веществ в воздухе и осадках получены на станции мониторинга Листвянка, работающей в рамках программы мониторинга ЕАНЕТ с 2000 г. На основании подходов, разработанных в ЕАНЕТ для использования данных наблюдений в оценке кислотных выпадений, были рассчитаны потоки сухих осадений и их вариации за двадцатилетний период для различных типов подстилающей поверхности. Для определения влажных выпадений были использованы данные станций мониторинга химического состава осадков на территории исследования. Пространственное распределение интенсивности суммарных (сухих и влажных) потоков серы и азота для региона БПТ было получено для условий 2020 года. В районе станции ЕАНЕТ Листвянка вклад сухих выпадений в суммарные на водную поверхность, луга и хвойный лес составляет в среднем 50%, 67% и 85%, соответственно. Вклады сухого выпадения окисленного азота на те же типы подстилающей поверхности составляют в среднем 6%, 20% и 50%, а восстановленного азота – 50%, 56% и 60%, соответственно. Средневзвешенные величины потоков суммарных выпадений на разные зоны суши БПТ оценены для окисленной серы  $1300 - 1400 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$ , окисленного и восстановленного азота  $200 - 270 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$  и  $340 - 360 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$ , соответственно. Отмечено, что потоки выпадений этих веществ на акваторию озера Байкал существенно меньше.

**Ключевые слова.** ЕАНЕТ, сухое осаждение, влажное осаждение, сера, азот, Байкал.

---

**Model estimates of atmospheric deposition of sulfur and nitrogen compounds to Baikal Natural Territory based on observed concentration in air and precipitation**

---

*I.S. Ilyin<sup>1)</sup>, D.A. Galushin<sup>1)</sup>, S.A. Gromov<sup>1,2)</sup>, E.S. Zhigacheva<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,  
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

<sup>2)</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Science,  
29, Staromonetnyi lane, 119017, Moscow, Russian Federation

\*Correspondence address: *i.ilyin@igce.ru*

**Abstract.** Results of the model estimates of oxidized sulfur, oxidized and reduced nitrogen total atmospheric deposition fluxes to the Baikal Natural Territory (BNT) are presented. Measured data on concentrations in air and precipitation and modelling of ecosystem-dependent dry deposition velocities were used. Measurement data on the pollutant air concentrations were obtained at Listvyanka monitoring site which has been working under the international EANET monitoring programme since 2000. Ecosystem-dependent dry deposition fluxes and their variability over twenty-year period were estimated following the modelling approach practically developed in the EANET programme with the guidelines and recommendations addressing to application of monitoring data. For simulation of wet deposition the data on precipitation chemistry monitoring stations located on the research area were used. Spatial distribution of total (wet and dry) atmospheric deposition fluxes of sulfur and nitrogen across the BNT area was evaluated for the conditions of 2020. Sulfur dry deposition to water, grassland and coniferous forest in the Listvyanka area contributes around 50%, 67% and 85% to its total deposition, respectively, on average. Contribution of oxidized nitrogen dry deposition for water, grassland and coniferous forests amounts to 5%, 20% and about 50%, respectively. The similar corresponding values for dry deposition of reduced nitrogen were 50, 56 and 60%. Within the BNT domain the area-weighted mean deposition flux to different land type areas is about 1300-1400 mg·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup> (sulfur), 200-270 mg·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup> (oxidized nitrogen) and 340-360 mg·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup> (reduced nitrogen), while mean deposition flux to the Lake Baikal water surface is substantially lower.

**Keywords.** EANET, dry deposition, wet deposition, sulfur, nitrogen, Lake Baikal.

## Введение

Международная программа EANET (EANET – Acid deposition monitoring network in East Asia) начала свою деятельность в 1998 году. Быстрая индустриализация стран Восточной и Юго-восточной Азии в конце XX – начале XXI века сопровождалась ускоряющимся ростом выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и увеличению загрязнения воздуха (Carmichael et al., 2002, Yang et al., 2024). Для оценки масштабов проблем и разработки мер ограничения последствий возникла необходимость получать регулярную информацию об уровнях загрязнения воздуха и других природных сред. Сеть международного мониторинга EANET была организована как региональная

---

инициатива 13 стран субконтинента, включая Россию. Основными целями ЕАНЕТ при её создании определены: 1) проведение долгосрочного мониторинга загрязнения природной среды; 2) обеспечение информационной поддержкой для принятия решений на региональном, национальном и международном уровнях с целью уменьшения последствий негативного влияния кислотных выпадений на окружающую среду и 3) обеспечение научного и технического взаимодействия между странами-участницами программы по вопросам, связанным с проблемами кислотного загрязнения (ЕАНЕТ, 2005). Начиная с 2000 года в России работает сеть из четырёх станций ЕАНЕТ. Три станции – Монды (фоновая), Листвянка (региональная), и Иркутск (городская) – расположены в районе оз. Байкал, а четвертая – Приморская (региональная, с 2002 г.) расположена в Приморском крае (Gromov et al., 2006).

Целью данного исследования является количественная оценка потоков суммарного выпадения атмосферных соединений серы и азота, и вкладов сухого и влажного выпадений в суммарные выпадения для станции Листвянка и на Байкальской природной территории (БПТ), включающую акваторию озера Байкал и экологические зоны БПТ. Для оценки измеряемого поступления кислотообразующих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность непосредственно по данным наблюдений в виде влажных выпадений используются данные мониторинга концентраций в атмосферных осадках и суммы осадков. Для расчетов сухих выпадений в рамках программы ЕАНЕТ был разработан подход, учитывающий значения концентраций и свойств загрязняющих веществ в приземном слое воздуха, влияние метеорологических параметров на процессы выведения из атмосферы и особенности подстилающей поверхности (Strategy Paper, 2010). Этот подход, в дальнейшем реализованный в технические документы и рекомендации, был использован в данной работе с целью исследовать влияние разных видов подстилающей поверхности на интенсивность и величину потоков сухих выпадений окисленной серы, окисленного азота и восстановленного азота в районе станции ЕАНЕТ Листвянка и на БПТ.

## Методы и материалы

### *Изучаемая территория*

Согласно законодательству Российской Федерации (Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ), Байкальская природная территория (БПТ) включает акваторию озера Байкал, водоохранную зону, окружающую озеро Байкал, территорию водосбора озера в пределах границ России, особо охраняемые природные территории, а также прилегающая к озеру территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него (<https://rpn.gov.ru/activity/baikal/>). БПТ представлена тремя экологическими зонами (рис. 1). Центральная экологическая зона (ЦЭЗ) включает Озеро Байкал, его острова, водоохранную зону озера и особо охраняемые природные территории, примыкающие к Байкалу. Границы ЦЭЗ совпадают с границами Байкала как объекта всемирного природного наследия ЮНЕСКО. В представленной работе мы рассматриваем акваторию

озера Байкал и сухопутную часть ЦЭЗ как две отдельных территории. Буферная экологическая зона (БЭЗ) покрывает территорию водосбора озера Байкал в пределах границ России. Зона атмосферного влияния (ЗАВ) располагается к западу и северо-западу от озера и не затрагивает территорию его водосбора. Эта территория охватывает большинство источников атмосферного загрязнения воздуха, влияющих на природу Байкала.



**Рисунок 1.** Байкальская природная территория и её экологические зоны

**Figure 1.** Baikal Natural Territory (BNT) and its ecological zones

### *Данные мониторинга*

Мониторинг концентраций в воздухе и потоков влажных выпадений на станции Листвянка ( $51^{\circ}50'47''$  с.ш.,  $104^{\circ}53'34''$  в.д., рис. 1) по согласованной международной программе наблюдений ЕАНЕТ осуществляется с 2000-го года. Станция расположена на вершине холма на высоте 646 м над уровнем моря на юго-западном берегу озера. Окружающая местность представлена холмами с высотами от 600 до 900 м. На расстоянии около 1 км к юго-западу от станции расположены окрестности посёлка Листвянка, и в 4-х километрах к югу от станции находится побережье озера Байкал. Растительность представлена хвойными и лиственными лесами. Преобладающими направлениями ветра на станции являются ССЗ и СВ.

Отбор проб осадков осуществляется после каждого эпизода выпадения осадков. В случае затяжных дождей отбор производится раз в сутки. В тёплый сезон используется автоматический пробоотборник с диаметром воронки 375 мм US-320 (изготовитель – Япония), с открывающейся крышкой исключительно при наличии осадков. В холодный сезон пробоотбор осуществляется

вручную, путем сбора снега из открытой воронки или заменяющей ее емкости. Отбор проб для измерения концентраций газов и аэрозолей в воздухе проводится с помощью четырёхступенчатой кассеты с набором фильтров. Аккумуляция пробы осуществляется при прокачивании воздуха в течении недели (EANET, 2003). Метеорологические параметры, измеряемые непосредственно на станции, включают скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха в приземном слое. Данные о тех же и других метеорологических параметрах могут быть получены с метеорологической станции Исток Ангары, расположенной в 7 км к северо-западу от площадки отбора проб.

Химический анализ отобранных на станции Листвянка проб проводится в Лаборатории гидрохимии и атмосферной химии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) с использованием ионной хроматографии. В ходе химического анализа атмосферных осадков измеряются концентрации 12 основных неорганических ионов, включая  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Cl}^-$ , а также pH и электропроводность. В пробах атмосферного воздуха определяются концентрации газовых составляющих ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ) и ионов водорастворимых фракций взвешенных частиц ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ).

### **Моделирование сухого выпадения**

Суммарный поток выпадений является суммой потоков сухого и влажного выпадений. Поток сухого выпадения  $F_d$  пропорционален приземной концентрации в воздухе (1). Коэффициентом пропорциональности является скорость сухого осаждения  $V_d$ , зависящая от высоты  $z$  над поверхностью:

$$F_d = C \cdot V_d(z) \quad (1)$$

Параметризация потока сухого выпадения основана на подходах, принятых в программе EANET (EANET, 2010). При вычислении скорости сухого осаждения предполагается, что частице или молекуле загрязняющего вещества, прежде чем достигнуть поверхности, надо преодолеть сопротивление приземного турбулентного слоя атмосферы  $R_a(z)$ , сопротивление приповерхностного квази-ламинарного слоя  $R_b$  и сопротивления поверхности  $R_c$ . Скорость сухого осаждения является обратной величиной суммы этих трёх сопротивлений (Wesely and Hicks, 1977)

$$V_d(z) = \frac{1}{R_a(z) + R_b + R_c} \quad (2)$$

Аэродинамическое сопротивление  $R_a$  рассчитывается согласно формуле (3):

$$R_a(z) = \frac{1}{k \cdot u^*} \cdot \left( \ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) - \Psi_h\left(\frac{z-d}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_o}{L}\right) \right) \quad (3)$$

Здесь  $k$  – безразмерная константа Кармана (0.4),  $z_0$  – параметр шероховатости,  $L$  – масштаб длины Монина-Обухова,  $d$  – высота слоя вытеснения,  $u^*$  – скорость трения и  $\Psi_h$  – функция коррекции устойчивости атмосферы для тепла. Функции  $\Psi_h$  рассчитываются в соответствии с работой Эрисмана и Драайерса (Erisman, Draaijers, 1995). Высота слоя вытеснения  $d$  обычно оценивается как 0.7- 0.8 от высоты леса  $h_c$  (Jacobson, 1999; Kaimal and Finnigan, 1994). В данной работе принято, что  $d = 0.75h_c$ . Значения  $z_0$  варьируются в зависимости от типов подстилающей поверхности и сезонности. Было использовано разделение на пять сезонов (Wesely, 1989): 1 – середина лета с пышной растительностью, 2 – осень с ещё не убраным урожаем, 3 – поздняя осень после заморозков, но без снега, 4 – зима с поверхностью, покрытой снегом, и 5 – переходный весенний сезон, когда начинают вегетировать однолетние растения. Значения  $z_0$ , использованные в расчётах для различных типов подстилающей поверхности и сезонов, представлены в табл. 1 (EANET, 2010).

**Таблица 1.** Значения  $z_0$  (м) для типов растительности в разные сезоны и высота растительности  $h_c$  (м), использованные в расчётах  
**Table 1.** Values of  $z_0$  (m) for vegetation types in different seasons and vegetation height  $h_c$  (m) used in the model simulations

| Тип подстилающей поверхности              | Сезон 1  | Сезон 2  | Сезон 3  | Сезон 4  | Сезон 5  | hс   |
|-------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| Вечнозелёные хвойные леса                 | 0.8      | 0.9      | 0.9      | 0.8      | 0.8      | 30.0 |
| Листопадные хвойные леса                  | 0.85     | 0.85     | 0.85     | 0.85     | 0.85     | 30.0 |
| Листопадные широколиственные леса         | 1.05     | 1.05     | 0.95     | 1.05     | 1.05     | 30.0 |
| Смешанные леса                            | 1.15     | 1.15     | 1.15     | 1.15     | 1.15     | 30.0 |
| Закрытые кустарники                       | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.4      | 0.5      | 5.0  |
| Открытые кустарники                       | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.3      | 0.4      | 4.0  |
| Лесостепи                                 | 0.8      | 0.8      | 0.8      | 0.8      | 0.8      | 10.0 |
| Степи                                     | 0.7      | 0.7      | 0.7      | 0.7      | 0.7      | 8.0  |
| Луга                                      | 0.1      | 0.1      | 0.05     | 0.02     | 0.05     | 0.0  |
| Болота                                    | 0.03     | 0.03     | 0.02     | 0.02     | 0.03     | 0.0  |
| Сельхозугодия                             | 0.1      | 0.1      | 0.2      | 0.2      | 0.05     | 0.0  |
| Городская застройка                       | 1.0      | 1.0      | 1.0      | 1.0      | 1.0      | 5.0  |
| Мозаика из природных/возделываемых земель | 0.2      | 0.2      | 0.1      | 0.1      | 0.2      | 1.0  |
| Снег/лёд                                  | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.0  |
| Без растительности                        | 0.04     | 0.04     | 0.04     | 0.04     | 0.04     | 0.0  |
| Водная поверхность                        | f(u) (1) | f(u) (1) | f(u) (1) | f(u) (1) | f(u) (1) | 0.0  |

(1): функция скорости ветра (см. формулу 10)

Сопротивление квази-ламинарного слоя  $R_b$  вычисляется согласно Эрисману и Драайерсу (Erisman, Draaijers, 1995):

$$R_b = \frac{2}{k \cdot u^*} \cdot \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (4)$$

Здесь  $Sc$  и  $Pr$  – числа Шмидта и Прандтля, соответственно.

Расчёт сопротивления поверхности  $R_c$  осуществляется в соответствии с подходом, при котором  $R_c$  складывается из ряда сопротивлений, включающих сопротивления кроны, подлеска, поверхности травы, и т.д. (Wesely, 1989). Кроме того, для  $SO_2$  и  $NH_3$  вводится коррекция сопротивления поверхности на влажность (Erisman, 1994; Smith, 2000). Также, в соответствии с условиями для сезона вводится учёт снежного покрова на поверхности. Скорость сухого осаждения для взвешенных частиц вычисляется по формуле (Erisman et al., 1997; ЕАНЕТ, 2010):

$$V_d = \left( \frac{1}{V_{ds}} + R_a \right)^{-1} + V_s \quad (5)$$

Где  $V_{ds}$  – так называемая приземная скорость выведения, и  $V_s$  – скорость осаждения за счёт гравитации.  $V_s$  рассчитывается по формуле (Seinfeld, Pandis, 2016):

$$V_s = \frac{\rho_p \cdot D_p^2 \cdot g \cdot C_c}{18 \cdot \mu} \quad (6)$$

В формуле (6)  $\rho_p$  – плотность частиц,  $D_p$  – диаметр частиц,  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $g$  – ускорение свободного падения и  $C_c$  – поправка Каннингхема на проскальзывание.

Расчётные формулы для приземной скорости выведения  $V_{ds}$  зависят от типа подстилающей поверхности. Для поверхностей, покрытых низкой растительностью (например, луга, сельхозугодия), применяется следующая параметризация для устойчивой и нейтральной (7) и неустойчивой (8) стратификации приземной атмосферы (Wesely et al., 1985):

$$V_{ds} = u^* / 500 \quad (7)$$

$$V_{ds} = (u^* / 500) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{300}{-L} \right)^{2/3} \right] \quad (8)$$

Для поверхностей, покрытых высокой растительностью (леса, кустарники, редколесья) для расчёта  $V_{ds}$  применяется другая формула (Ruijgrok et al., 1997):

$$V_{ds} = E \cdot (u^{*2} / u_h) \quad (9)$$

здесь  $E$  – эффективность захвата и  $u_h$  – скорость ветра на уровне высоты растительности. Параметризация эффективности захвата различается для

отдельных компонентов частиц (сульфаты, нитраты, аммоний, основные катионы) и для сухой и влажной подстилающей поверхности.

Около 9% территории БПТ представляет собой водную поверхность. Методика ЕАНЕТ по оценке потоков выпадений предназначена только для поверхностей суши, поэтому для учёта сухих выпадений на водную поверхность применялись подходы, представленные в других работах (Zhang et al., 2002, 2003). Скорость сухого выведения газовых компонент также рассчитывается по формуле (1). При этом учитывается зависимость параметра шероховатости от скорости ветра (Garrat, 1999):

$$z_0 = a_c \cdot u^* + 11.0 \cdot \nu / u^* \quad (10)$$

Здесь  $a_c$  – константа Чарнока ( $\approx 0.016$  с) и  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха.

Сопротивление поверхности оценивается по формуле (Zhang et al, 2002, 2003):

$$\frac{1}{R_c} = \frac{\alpha}{R_{gSO_2}} + \frac{\beta}{R_{gO_3}} \quad (11)$$

В (11)  $\alpha$  и  $\beta$  являются специфическими для каждого газ безразмерными параметрами,  $R_{gSO_2}$  ( $10 \text{ с} \cdot \text{м}^{-1}$ ) и  $R_{gO_3}$  ( $2000 \text{ с} \cdot \text{м}^{-1}$ ) являются сопротивлениями поверхности воды для  $SO_2$  и озона, соответственно. Для  $SO_2$  и  $NH_3$   $\alpha$  и  $\beta$  равны 1 и 0, и для  $HNO_3$  10 и 10, соответственно (Zhang et al., 2002).

Для расчёта скорости сухого выведения частиц на водные поверхности разработан ряд схем (Slinn, Slinn, 1980; Williams et al., 1982; Zhang et al., 2001; Petrov, Zhang, 2010; Pleim, Ran, 2010; Kouznetsov, Sofiev, 2012; Zhang, Shao, 2014; Zhang, He, 2014). В работе Кана и Перлингера (Khan, Perlinger, 2017) представлены результаты сравнения различных схем сухого выведения на водные поверхности с измеренными значениями. Было показано, что при использовании схемы (Zhang, He, 2014) продемонстрировано наименьшее отклонение от измеренных величин. Для частиц размером менее 2.5 мкм (ТЧ2.5)  $V_{ds}$  рассчитывается следующим образом:

$$V_{ds} = a_1 \cdot u^* \quad (12)$$

Здесь  $a_1$  – безразмерный эмпирический коэффициент, зависящий от типа подстилающей поверхности и равный для воды  $6.9 \times 10^{-3}$ . В работе предполагается, что сульфаты, нитраты и аммоний представлены в основном частицами размером до 2.5 мкм. Измеренные на станции Листвянка месячные медианные значения концентраций ТЧ2.5 варьируются от 4 до 12  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , а ТЧ10 – от 5 до 13  $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , таким образом подтверждая преобладание частиц 2.5 мкм (Шиховцев и др., 2023). Аналогичный вывод можно сделать на основании результатов измерений в Байкальском регионе, представленных в работе Dementeva et al. (2022). Однако, важно отметить, что в случае природных пожаров вклад более крупных частиц (от 2.5 до 10 мкм) в концентрации

ТЧ10 в воздухе может значительно возрастать (Dementeva et al., 2022; Жамсуева и др., 2022; Popovicheva et al., 2021).

Расчёт скорости сухого осаждения для района станции Листвянка проводился для трёх типов подстилающей поверхности: хвойный лес, луг и водная поверхность. Для оценки потоков выпадений на БПТ и её отдельные экологические зоны, сделанной для 2020 года, была введена модельная сетка с шагом  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  по долготе/широте для территории от  $48^\circ$  до  $58^\circ$  с.ш. и от  $101^\circ$  до  $114^\circ$  в.д. Метеорологические данные, данные о типах подстилающей поверхности и данные измерений концентраций в осадках, использованные для расчётов потоков выпадений, описаны ниже.

### **Моделирование влажных выпадений**

Поток влажного выпадения  $F_w$  рассчитывается как произведение концентрации в осадках  $C_{prec}$  и суммы осадков  $P$  (13):

$$F_w = C_{prec} \cdot P \quad (13)$$

Для станции Листвянка  $F_w$  рассчитывался с использованием измеренных величин концентраций в осадках ионов сульфатов, нитратов и аммония. Для анализа потоков влажных выпадений на территорию БПТ привлекались данные измерений, полученных на сети мониторинга химического состава осадков, работающей под научно-методическим руководством Главной геофизической обсерватории им. Воейкова (ГГО) (рис. 2). Были рассмотрены данные с двадцати одной станции, расположенной на территории или вблизи БПТ и относящейся к Иркутскому, Забайкальскому, Якутскому и Среднесибирскому УГМС (Першина и др., 2021).



**Рисунок 2.** Расположение станций мониторинга химического состава осадков в Восточной Сибири

**Figure 2.** Location of precipitation chemical composition monitoring stations in Eastern Siberia

В соответствии с методологией, принятой в ГГО, средние за год концентрации в осадках рассчитываются как средневзвешенная величина среднемесячных концентраций ( $c_i$ ), и в качестве веса используются месячные суммы осадков  $P_i$  (14):

$$C_{prec} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (14)$$

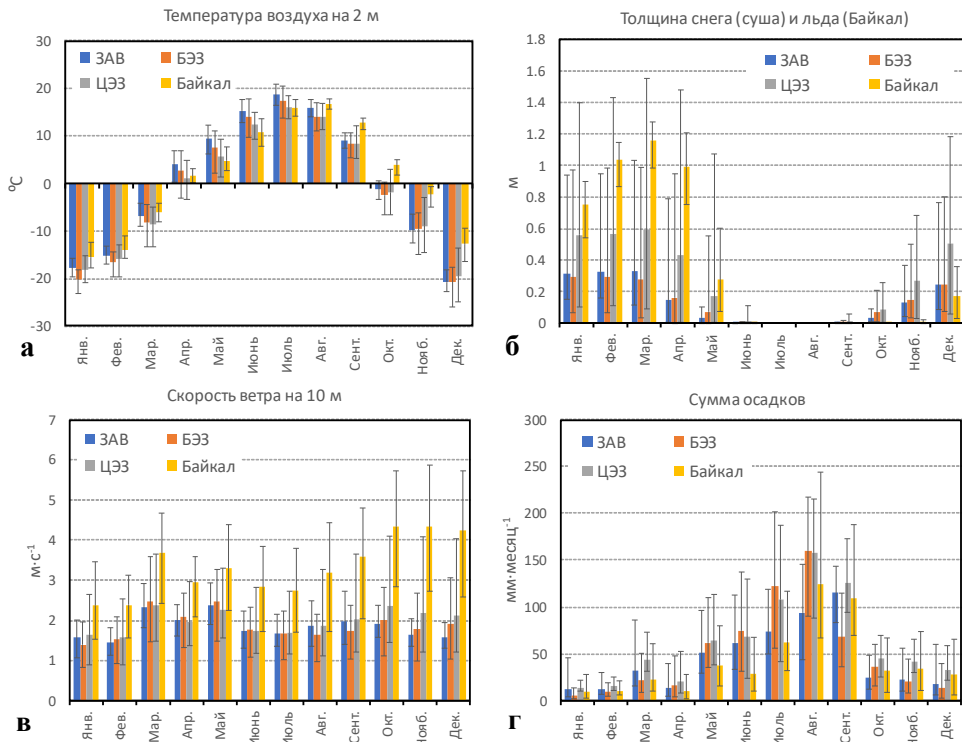
Данные измерений концентраций в осадках на станциях были интерполированы на регулярную сетку с шагом  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  используя метод обратных расстояний. Предполагалось, что вес каждой станции в каждой ячейке сетки пропорционален концентрации на станции и обратному квадрату расстояния между станцией и серединой ячейки сетки. Далее, поток влажных выпадений в каждой ячейке рассчитывался как произведение интерполированных концентраций и годовых сумм осадков в каждой ячейке.

### ***Метеорологическая информация***

Метеорологические данные для расчётов выпадений на станции Листвянка и на БПТ получены на основе результатов ре-анализа ERA5-Land с пространственным разрешением  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (Muñoz Sabater, 2019). В частности, использовались температура воздуха и точка росы на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, приземное давление, приземная приходящая коротковолновая радиация, толщина снежного покрова и толщина озёрного льда. Кроме того, поле полной облачности с исходным разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  было проинтерполировано на сетку  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Для получения информации о толщине снежного покрова для водных и прибрежных ячеек сетки использовалась информация о снежном покрове, полученная в ходе полевых снегомерных измерений в России (<http://meteo.ru/>).

Средние за месяц значения температуры воздуха, толщины снега и льда, скорости ветра, и суммарных за месяц осадков в БПТ и её отдельных зонах показаны на рис. 3. Байкальский регион характеризуется резкоконтинентальным климатом с жарким влажным летом и холодной сухой зимой. Максимальные температуры над сухопутной частью БПТ отмечаются в июле, минимальные – в январе (рис. 3а). Из-за медленного прогревания значительной водной массы байкальской воды максимум температуры воздуха над озером Байкал сдвинут на август (Латышева и др., 2009). Согласно данным ERA5, Байкал покрывается льдом в конце декабря – начале января, а разрушение ледяного покрова происходит в мае (рис. 3б). Это согласуется с результатами исследования ледяного покрова Байкала на основе спутниковых данных (Kouraev et al., 2007). Отопляющее воздействие открытой воды Байкала в ноябре-декабре приводит к температуре на  $7-8^\circ\text{C}$  выше над водой в сравнении с температурой воздуха над сушей. Тёплый период продолжается с апреля по октябрь. Внутригодовой ход скорости ветра характеризуется наличием двух

максимумов и двух минимумов (рис. 3в). Осенний максимум объясняется усилением зонального переноса, большими местными градиентами температуры и давления между относительно тёплой поверхностью озера Байкал и относительно холодной суши (Латышева и др., 2009). После того, как озеро покрывается льдом, градиенты ослабевают, и скорость ветра становится минимальной. Второй максимум весной обусловлен усилением атмосферной циркуляции. Месячные суммы осадков имеют максимум летом и минимум зимой (рис. 3г). Осадки тёплого периода (100-150 мм/месяц) на порядок выше, чем осадки в холодный период (10-30 мм/месяц) из-за преобладания высокого давления зимой. Для станции Листвянка характер изменения метеорологических характеристик в целом тот же, что и для БПТ (рис. 4).

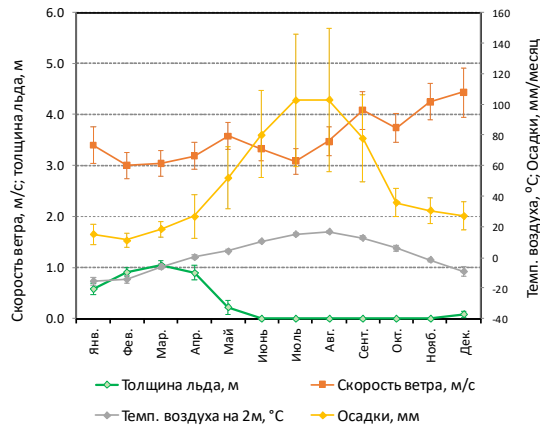


**Рисунок 3.** Средние за месяц осреднённые по пространству приземная температура (а), толщина снега или льда (б), приземная скорость ветра (в) и месячные суммы осадков (г) в различных зонах БПТ в 2020 г. «Усы» показывают разброс величин по пространству между 5-м и 95-м процентиллями

**Figure 3.** Monthly mean spatially averaged near-surface air temperature (a), snow or ice depth (b), near-surface wind velocity (c) and monthly precipitation sums (d) in different zones of BNT in 2020. “Whiskers” depict the range between 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentiles across the area

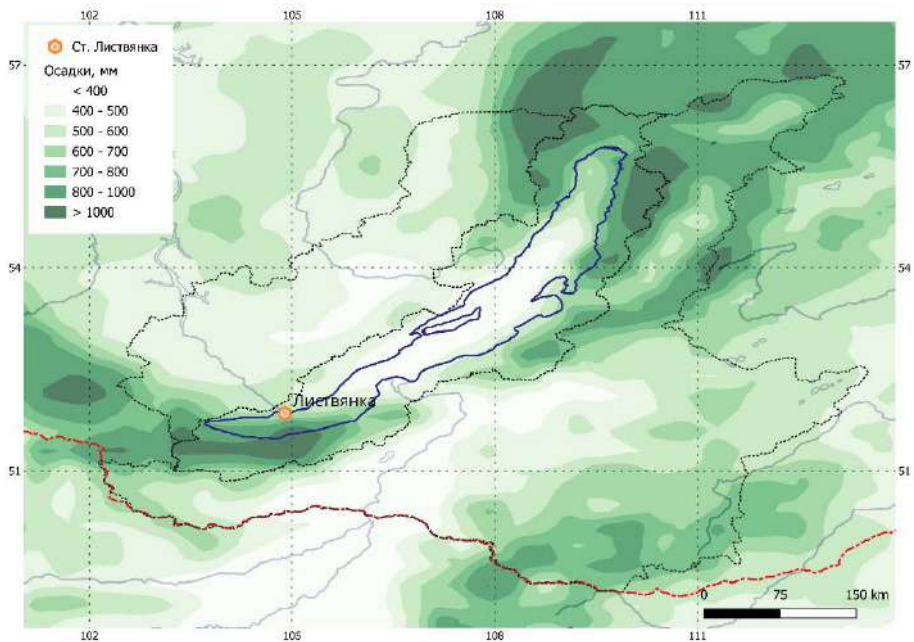
Если для оценки потоков сухих выпадений ключевым параметром является пространственное распределение типов подстилающей поверхности, влажные выпадения определяются распределением атмосферных осадков. Наиболее высокие величины годовых сумм осадков, превышающих 1000 мм, отмечаются в северо-восточной и западной частях БПТ (рис. 5). Кроме того, определённое увеличение сумм осадков (800-1000 мм) имеет место в

южной части рассматриваемого региона. Орографический эффект обуславливает сравнительно высокие величины осадков в горных районах БПТ. Над центральной частью БПТ и над озером Байкал годовые суммы осадков, как правило, ниже 600 мм.



**Рисунок 4.** Месячные суммы осадков, средние за месяц температура воздуха, скорость ветра и толщина снега и льда на станции Листвянка, осреднённые за 2004-2023 год

**Figure 4.** Monthly precipitation sums, monthly mean air temperature, wind velocity and snow and ice depth at the Listvyanka station, averaged over the 2004-2023 period



**Рисунок 5.** Пространственное распределение сумм осадков в 2020 году над БПТ

**Figure 5.** Spatial distribution of precipitation sums in 2020 over BNT

## Данные по подстилающей поверхности

Параметризация потоков сухих выпадений подразумевает необходимость применения данных о типах подстилающей поверхности в БПТ. В работе были использованы данные по типам подстилающей поверхности, полученные с помощью спутниковых измерений MODIS (код продукта MCQ12Q1) (Sulla-Menashe, Friedl, 2018). Набор данных содержит сеточные данные с шагом 500 м для всего земного шара. Набор MODIS предлагает данные по типам подстилающей поверхности, представленные в нескольких классификациях. В данной работе использовалась классификация IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme – Международная геосферно-биосферная программа), согласно которой выделяется 17 типов подстилающей поверхности. Из них 16 типов встречаются в пределах БПТ.

Доли площадей, занимаемых отдельными группами типов подстилающей поверхности в границах БПТ и её экологических зонах (кроме акватории озера Байкал), приведены в табл. 2. Группа «леса», включающая хвойные вечнозелёные, хвойные листопадные, листопадные широколиственные и смешанные леса, занимают около 27% площади БПТ. Группа «кустарники и степи» включает степи, лесостепи, сплошные и разреженные кустарники и покрывает 44% площади БПТ. Группа «низкая растительность» представлена лугами, сельхозугодиями, болотами и мозаикой обрабатываемых и природных земель. Остальные типы подстилающей поверхности (земли, лишённые растительности, городская застройка, ледники, поверхность воды, включающая акваторию Байкала) включены в группу «Другие». Их доля составляет около 10% площади.

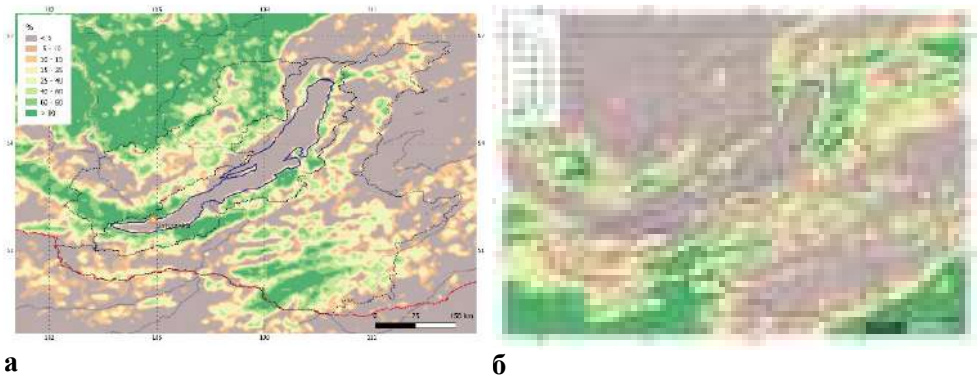
**Таблица 2.** Доля площади БПТ (%), занимаемая типами подстилающей поверхности, полученная на основе данных MODIS. Жирный шрифт: группы типов подстилающей поверхности, курсив – типы подстилающей поверхности по классификации IGBP

**Table 2.** BNT area fraction (%) covered by land cover types based on the MODIS data. Bold: groups of land cover types, italic – land cover types according to IGBP classification

| Типы подстилающей поверхности | ЗАВ  | БЭЗ  | ЦЭЗ   | Озеро Байкал | Суммарно для БПТ |
|-------------------------------|------|------|-------|--------------|------------------|
| <i>Леса</i>                   | 38.2 | 24.5 | 35.8  | 0.0          | 27.3             |
| Хвойные вечнозелёные          | 6.5  | 3.9  | 14.3  | 0.0          | 5.8              |
| Хвойные листопадные           | 11.5 | 12.3 | 6.1   | 0.0          | 10.1             |
| Листопадные широколиственные  | 2.3  | 1.0  | 0.4   | 0.0          | 1.1              |
| <i>Смешанные</i>              | 17.8 | 7.5  | 14.9  | 0.0          | 10.4             |
| Кустарники и степи            | 46.3 | 52.0 | 38.1  | 0.0          | 44.1             |
| Сплошные кустарники           | 0.0  | 0.0  | 0.011 | 0.0          | 0.0              |
| Разреженные кустарники        | 0.4  | 0.7  | 2.6   | 0.0          | 0.9              |
| Лесостепь                     | 44.2 | 37.6 | 28.5  | 0.0          | 34.4             |
| Степь                         | 1.7  | 13.7 | 7.0   | 0.0          | 8.8              |

| Типы подстилающей поверхности                 | ЗАВ   | БЭЗ   | ЦЭЗ   | Озеро Байкал | Сум-<br>марно<br>для БПТ |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|--------------|--------------------------|
| <i>Низкая растительность</i>                  | 14.2  | 22.4  | 20.9  | 0.0          | 18.4                     |
| Луга                                          | 9.7   | 22.1  | 19.8  | 0.0          | 17.1                     |
| Болота                                        | 0.1   | 0.1   | 1.0   | 0.0          | 0.2                      |
| Сельхозугодия                                 | 4.0   | 0.2   | 0.1   | 0.0          | 1.0                      |
| Мозаика обрабатываемых/ при-<br>родных земель | 0.4   | 0.002 | 0.006 | 0.0          | 0.1                      |
| Другие                                        | 1.3   | 1.0   | 5.2   | 100.0        | 10.2                     |
| Городская застройка                           | 0.9   | 0.5   | 0.1   | 0.0          | 0.5                      |
| Снег и лёд                                    | 0.000 | 0.012 | 0.004 | 0.0          | 0.007                    |
| Лишённые растительности                       | 0.035 | 0.300 | 0.347 | 0.0          | 0.2                      |
| Водные объекты                                | 0.4   | 0.2   | 4.7   | 100.0        | 9.4                      |

Примеры пространственного распределения групп «Леса» и «Низкая растительность» на регулярной сетке приведены на рис. 6. Наибольшая пространственная плотность лесов (>60% от площади ячеек сетки) отмечается в северо-восточной, юго-западной и западной частях ЗАВ, вдоль юго-восточного побережья Озера Байкал и в западной части ЦЭЗ, а также в южной части БЭЗ. Области с низкой растительностью преобладают в основном в центральной и западной частях ЗАВ и в центральной и северо-восточной частях БЭЗ.



**Рисунок 6.** Пространственное распределение доли (%) в ячейках сетки групп типов подстилающей поверхности «Леса» (а) и «Низкая растительность» (б) в БПТ

**Figure 6.** Spatial distribution of gridcell area fractions (%) of type groups “Forests” (a) and “Low vegetation” (b) in BNT

### Результаты

#### *Поток выпадений на станции Листвянка в 2004-2021 гг.*

Суммарные выпадения окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на станции Листвянка были оценены для трёх типов подстилающей поверхности: поверхность с высокой растительностью (хвойный лес),

поверхность с низкой растительностью (луг) и водная поверхность. Оценки проведены для периода с 2004 по 2023 год.

На рис. 7 показаны средние за месяц скорости сухого осаждения серы и азота в газовой и аэрозольной (в виде частиц) фазах, а также интервал изменений среднемесячных величин с 2004 по 2023 г. Скорость сухого осаждения  $\text{SO}_2$  на лес и луг демонстрирует явно выраженную сезонную изменчивость с наиболее низкими значениями (около  $0.15$  для луга и  $0.3\text{--}0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ) в холодный период и с наиболее высокими значениями весной и ранней осенью (рис. 7а). Максимальные значения  $V_d$  для леса составляют  $2.9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ , а для луга –  $1.2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ . Главным фактором, влияющим на сезонные изменения  $V_d$ , является сезонная изменчивость поверхностного сопротивления  $R_c$ , вычисляемого согласно (11) (Wesely, 1989; EANET, 2010). Скорость сухого осаждения  $\text{SO}_2$  на водную поверхность достигает самых низких значений (около  $0.1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ) в период с января по апрель. Это объясняется тем, что в это время Байкал покрыт льдом, а скорость сухого осаждения на лёд ниже, чем на воду.

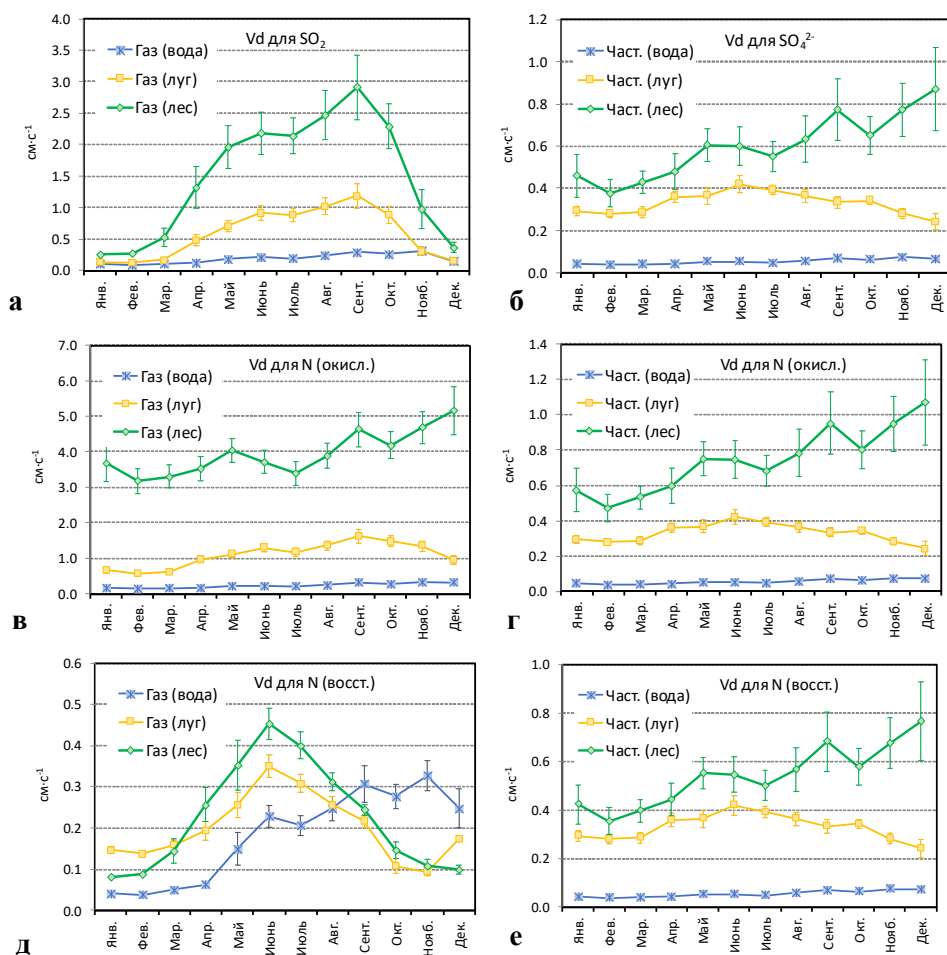
Среднемесячные значения скорости сухого осаждения аэрозольной серы на поверхности с высокой растительностью достигает минимума в феврале ( $0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ), а наибольшие – в декабре ( $0.9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ) (рис. 7б). Согласно параметризации (Ruijgrok, 1997), поверхностная скорость выпадения пропорциональна  $(u^*)^2$ , и обратно пропорциональна скорости ветра (см. формулу 9). Так как скорость трения также пропорциональна скорости ветра, то можно считать, что  $V_{ds}$  прямо пропорциональна скорости ветра. Кроме того, эффективность захвата, в свою очередь, также пропорциональна  $(u^*)^p$ , где показатель степени  $p$  варьируется от  $0.25$  до  $0.45$  в зависимости от конкретного загрязнителя и влажности подстилающей поверхности. Средние за месяц скорости ветра на ст. Листвянка имеют изменчивость, схожую с изменчивостью для  $V_d$  для леса (рис. 4). Скорость сухого осаждения для луга зависит от скорости ветра (через  $u^*$ ) и от устойчивости атмосферы (см. формулы 7, 8). Комбинация этих факторов приводит к тому, что наибольшая среднемесячная скорость сухого осаждения достигается в июне ( $0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ), а наименьшая – в декабре (около  $0.2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Скорость сухого осаждения на водную поверхность пропорциональна скорости трения (формула 12). Следовательно, её сезонная изменчивость соответствует изменчивости скорости ветра (рис. 4). Скорость сухого осаждения других соединений, представленных в форме частиц, т.е., окисленного азота и аммония, на воду и луг (рис. 7 г, е) такие же, как и у окисленной серы, и немного различаются для леса.

Сезонная изменчивость скорости сухого осаждения газообразного окисленного азота ( $\text{HNO}_3$ ) на лес значительно отличается от скорости для  $\text{SO}_2$  (рис. 7в). Благодаря очень высокой растворимости азотной кислоты её приземное сопротивление практически пренебрежимо мало по сравнению с аэродинамическим и квази-ламинарным сопротивлением. Следовательно, скорость сухого осаждения  $\text{HNO}_3$  становится пропорциональным скорости трения, и её сезонные изменчивость в целом совпадает с сезонной изменчивостью скорости приземного ветра. Подобное объяснение также приемлемо для описания сезонного хода скорости сухого осаждения на луг. Однако, необхо-

димо принимать в расчёт то, что параметр шероховатости для холодного периода, использованный при моделировании, ниже, чем для тёплого (табл. 1). Это приводит к снижению значений скорости сухого осаждения в холодный период по сравнению с тёплым периодом, и формированию максимума скорости сухого осаждения ( $1.6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в сентябре.

Сезонные изменения скорости сухого осаждения  $\text{NH}_3$  в целом схожи с  $\text{SO}_2$  (рис. 7д). Максимальные среднемесячные значения  $V_d$  для леса ( $0.45 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и луга ( $0.35 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) имеют место в тёплый период, а минимальные – в холодный период ( $0.1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $0.15 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , соответственно). Эффективная растворимость у  $\text{NH}_3$  меньше, чем у  $\text{SO}_2$  и  $\text{HNO}_3$ , что приводит к более высокому поверхностному сопротивлению. Согласно применяемой в ЕАНЕТ параметризации сухого выведения (ЕАНЕТ, 2010), поверхностное сопротивление  $R_c$  аммиака на порядок выше, чем  $R_a$  и  $R_b$ . Это, в свою очередь, приводит к более низкой скорости сухого осаждения аммиака по сравнению со значениями для диоксида серы и азотной кислоты. Скорость сухого осаждения аммиака на воду сопоставима со значениями для  $\text{SO}_2$  и  $\text{HNO}_3$  и зависит от растворимости и метеорологических условий. Максимальные среднемесячные значения  $V_d$  (около  $0.3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) отмечаются в сентябре и ноябре, а минимальные ( $0.04 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) получены для января и февраля, что объясняется выпадением на поверхность льда.

Рассчитанные потоки выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка показаны на рис. 8. Годовые суммы выпадений серы на водную поверхность составляют от 260 до  $730 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в период с 2004 по 2024 год (рис. 8а). Среднее значение за рассматриваемый период составляет  $470 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Вклады сухого и влажного выведения в суммарный поток в среднем почти равны. Рассчитанные годовые потоки выпадений на луг варьируются от 360 до  $1320 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  со средним значением  $690 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (рис. 8б). Так как поток влажных выпадений не зависит от типа подстилающей поверхности, то вклад сухих выпадений на луг выше, чем на поверхность воды, и составляет 67% в среднем. Вклад сухих осадков в суммарные выпадения на лес ещё выше и составляют около 85% в среднем (рис. 8в). Значения потока суммарных годовых выпадений серы на лес на станции Листвянка находится в диапазоне от 650 до  $3000 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , и при этом среднее многолетнее значение составило  $1370 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Большая часть потока сухого осаждения обусловлена вкладом серы в газовой фазе, в то время как вклад аэрозольной серы составляет несколько процентов. Сравнительно низкий вклад частиц в выпадения объясняется, во-первых, более низкой концентрацией сульфата в воздухе на станции по сравнению с концентрацией диоксида серы, и, во-вторых, более низкой скоростью сухого осаждения. Поток сухого осаждения серы (в газовой и аэрозольной фазах) на водную поверхность почти вдвое ниже, чем на луг, и примерно в пять раз ниже, чем на лес. Рассчитанные потоки сухого осаждения серы сопоставимы с оценками (около  $368 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ), приведёнными в более ранних работах (Голобокова и др., 2007).

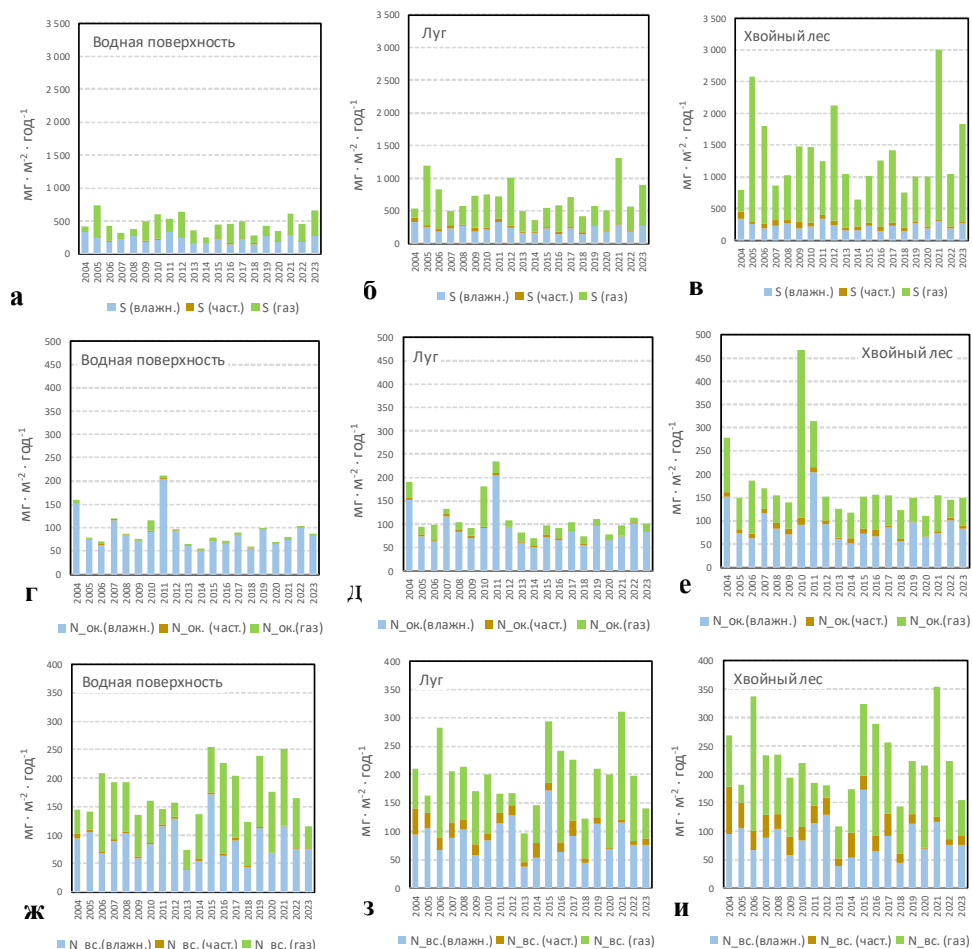


**Рисунок 7.** Скорости сухого осаждения (среднемесячные значения, осреднённые за 2004–2023 г. и их разброс за этот период) газовых (слева) и аэрозольных (справа) соединений серы (а,б), окисленного азота (в,г) и восстановленного азота (д,е) на станции Листвянка

**Figure 7.** Dry deposition velocities (monthly mean values averaged over 2004–2023, and the range over the period) of gaseous (left) and particulate (right) sulfur (a,b), oxidized nitrogen (c,d) and reduced nitrogen (e,f) compounds at the Listvyanka station

Годовой поток суммарных выпадений окисленного азота на водную поверхность в районе станции Листвянка в 2004–2023 гг. изменяется от 60 до 210  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  при среднем за период значении 90  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (рис. 8 г). Влажные выпадения являются основным вкладчиком в суммарные выпадения, и их доля составляет около 95%. Суммарные за год выпадения на травяную растительность (луг) и на хвойный лес меняются от 70 до 235  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (110  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в среднем) и от 119 до 470  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (180  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  в среднем), соответственно (рис. 8 де). Вклад сухих выпадений в суммарную величину выпадений для луга сравнительно невелик (около 20% в среднем), и сопоставим с вкладом влажных выпадений на лес (около 50% в среднем). Подобно сере, вклад окисленного азота в газовой фазе ( $\text{HNO}_3$ ) на порядок выше, чем

вклад аэрозольного азота ( $\text{NO}_3^-$ ). Поток сухих выпадений на водную поверхность в 4.6 раза ниже потока на луг, и почти в 17 раз чем на лес. Рассчитанный поток сухих выпадений азота на станции Листвянка несколько ниже, чем оценки для периода с 2000 по 2006 гг. в  $116 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$  (Голобокова и др., 2007).



**Рисунок 8.** Суммарные годовые потоки выпадений серы (S), окисленного азота ( $\text{N}_{\text{ок}}$ ) и восстановленного азота ( $\text{N}_{\text{вс}}$ ), разделённые на потоки сухих осадений частиц (част.), газов (газ) и влажных выпадений (влажн.) на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка

**Figure 8.** Total annual deposition fluxes of sulfur (S), oxidized nitrogen ( $\text{N}_{\text{ок}}$ ) and reduced nitrogen ( $\text{N}_{\text{вс}}$ ) split into dry deposition fluxes of particles (част.), gases (газ) and wet deposition fluxes (влажн.) to water surface (водная поверхность), grassland (луг) and coniferous forests (хвойный лес) at Listvyanka station

Средний поток суммарных выпадений восстановленного азота на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка равен 170, 200,  $225 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ , соответственно (рис. 8 ж,з,и). Соответствующие диапазоны значений годовых величин потоков составляют 70-255, 100-310 и  $110\text{-}350 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . В отличие от серы и окисленного азота, величина вклада сухих выпадений в суммарный поток выпадений близка для всех трёх типов подстилающей

поверхности, и составляет в среднем 50%, 56% и 60% на воду, луг и лес, соответственно. Это объясняется тем, что скорости сухого осаждения  $\text{NH}_3$  на разные типы подстилающей поверхности сопоставимы. Так как измеренные концентрации  $\text{NH}_3$  значительно выше, чем для  $\text{NH}_4^+$ , то и вклад газовой фазы в сухие выпадения восстановленного азота значительно выше, чем вклад аэрозольного восстановленного азота. В отличие от серы и окисленного азота, различия в величине потоков сухих выпадений восстановленного азота на рассмотренные типы подстилающей поверхности сравнительно невелики. Потоки сухих выпадений на луг на 30% и леса на 60% выше, чем на водную поверхность.

### ***Пространственное распределение выпадений в границах БПТ в 2020 г***

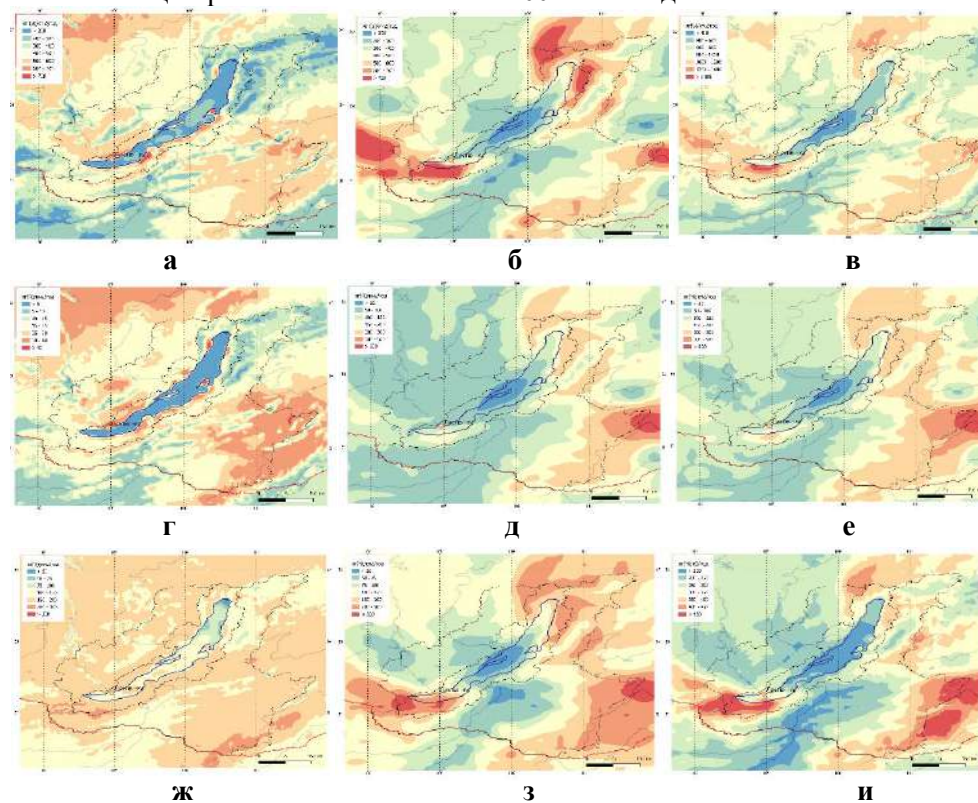
Пространственное распределение потоков суммарных выпадений зависит от ряда факторов, среди которых наиболее значимыми являются распределения типов подстилающей поверхности, режима и значений метеорологических параметров (особенно атмосферных осадков) и концентраций измеряемых веществ в осадках.

Наиболее высокие значения потоков сухих выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота в пределах БПТ отмечаются для южного побережья Озера Байкал (рис. 9 а,б). Относительно высокие потоки сухих выпадений в юго-восточной части БЭЗ объясняются сравнительно высокими средними скоростями ветра, приводящими к более высокой скорости трения и, следовательно, к более высоким значениям скорости сухого осаждения. Потоки выпадений серы и окисленного азота на водную поверхность сравнительно невелики. Схожие величины потоков сухих выпадений отмечаются для северо-восточной и юго-западной частей БЭЗ, что согласуется с пространственным распределением областей с низкой растительностью в этом регионе (рис. 6). Так как скорость сухого осаждения восстановленного азота менее чувствительна к особенностям подстилающей поверхности по сравнению с окисленной серой и азотом, то её пространственное распределение выглядит более сглажено (рис. 9ж).

Пространственные распределения потоков влажных выпадений всех трёх рассматриваемых соединений схожи. Сравнительно высокие уровни, встречающиеся в северо-восточной части БПТ, в западной части ЦЭЗ и ЗАВ в южной части БЭЗ (рис 9 б,д,з), обусловлены сравнительно высокими суммами осадков (рис. 5). Область высоких потоков влажных выпадений в восточной части БЭЗ объясняется высокими концентрациями компонентов на станции мониторинга в районе г. Чита. Аналогично, сравнительно высокие величины потоков выпадений серы в западной части ЗАВ обусловлены концентрациями, измеренными на станции Черемхово. Кроме того, высокие влажные выпадения аммония в западной части ЦЭЗ и ЗАВ являются комбинацией двух факторов – высоких значений концентраций, измеренных на станции Хамар-Дабан, и значительных годовых сумм осадков ( $> 1000$  мм).

Суммарные выпадения серы варьируются в основном от 400 до 1400  $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}$  (рис. 9в). Наибольшие величины потоков, превышающие 1400

$\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ , отмечаются на юго-западном побережье озера Байкал. Самые низкие потоки серы ( $<400 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) характерны для водной поверхности центральной части Байкала. Поток суммарных выпадений окисленного азота на большей части расчётной области лежит в пределах от 50 до  $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (рис. 9е). В восточной части БПТ отмечаются самые высокие потоки окисленного азота, составляющие от 200 до  $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ , а вблизи Читы превышающие  $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ . Над центральной частью озера Байкал потоки преимущественно ниже  $50 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ . На большей части БПТ поток восстановленного азота составляет от 200–450  $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (рис. 9и). В западной части ЗАВ и ЦЭЗ, а также в БЭЗ вблизи Читы потоки восстановленного азота превышают  $450 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ . Величины потоков на большей части акватории Байкала и в центральной части БЭЗ ниже  $200 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ .



**Рисунок 9.** Пространственное распределение потоков сухих (слева), влажных (в центре) и суммарных (справа) выпадений серы (вверху), окисленного азота (в центре) и восстановленного азота (внизу) в 2020 году на БПТ

**Figure 9.** Spatial distribution of dry (left), wet (middle) and total (right) deposition fluxes of sulfur (top), oxidized nitrogen (middle) and reduced nitrogen (bottom) in 2020 over BNT

### **Оценки суммарных выпадений на БПТ**

Результаты расчётов пространственного распределения выпадений на БПТ послужили основой для оценок среднего поступления серы и азота из атмосферы в границы зон БПТ. Рассчитанные суммарные выпадения серы, окисленного азота и восстановленного азота в 2020 году составили 40, 86 и

122 кг, соответственно, на всю площадь БПТ. Средние потоки сухого и влажного выпадения в выделенных зонах БПТ и на поверхность озера Байкал представлены в табл. 3. Средние потоки выпадений на сухопутные зоны БПТ составляют 1300-1400 мг·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>, что примерно вдвое выше, чем поток на акваторию Байкала. Подобное соотношение также отмечается для потоков окисленного азота, составляющих в среднем 200-270 мг·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> для зон суши и около 100 мг·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup> для поверхности озера Байкал. По сравнению с серой и окисленным азотом, у восстановленного азота это отношение ниже. В целом, более низкие потоки выпадений на водную поверхность Байкала объясняются меньшими суммами осадков и меньшей скоростью сухого осаждения на водную поверхность.

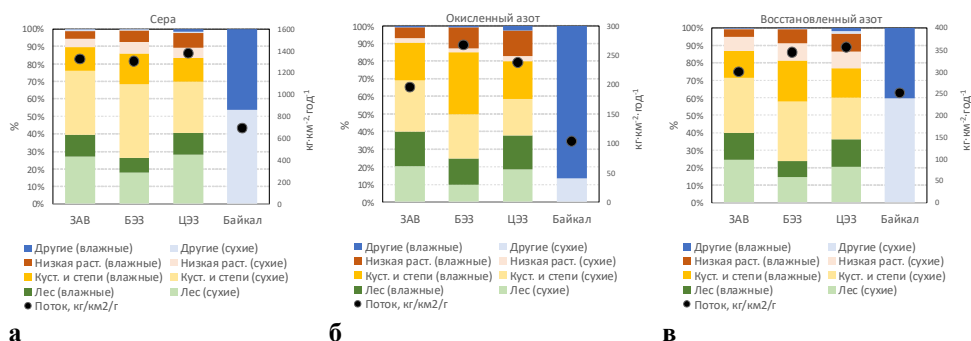
**Таблица 3.** Потоки выпадений (мг·м<sup>-2</sup>·год<sup>-1</sup>) серы, окисленного и восстановленного азота на сгруппированные типы подстилающей поверхности в отдельных зонах БПТ в 2020 году. «Сухие ср.-взвеш.» и «Влажные ср.-взвеш.» обозначают средневзвешенные по площади потоки сухих и влажных выпадений, соответственно

**Table 3.** Sulfur (Серa), oxidized nitrogen (Окисленный азот) and reduced nitrogen (Восстановленный азот) deposition fluxes (mg·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) to grouped land cover types in BNT zones in 2020. «Сухие ср.-взвеш.» и «Влажные ср.-взвеш.» denote area-weighted dry and wet deposition fluxes, respectively

| Тип подстилающей поверхности      | Серa |      |      |         | Окисленный азот |     |     |         | Восстановленный азот |     |     |         |
|-----------------------------------|------|------|------|---------|-----------------|-----|-----|---------|----------------------|-----|-----|---------|
|                                   | ЗАВ  | БЭЗ  | ЦЭЗ  | Бай-кал | ЗАВ             | БЭЗ | ЦЭЗ | Бай-кал | ЗАВ                  | БЭЗ | ЦЭЗ | Бай-кал |
| Леса (сухие)                      | 938  | 945  | 1079 | 0       | 104             | 108 | 125 | 0       | 192                  | 203 | 205 | 0       |
| Леса (влажные)                    | 424  | 433  | 484  | 0       | 100             | 160 | 126 | 0       | 121                  | 131 | 156 | 0       |
| Кустарники и степи (сухие)        | 1041 | 1059 | 1049 | 0       | 124             | 130 | 129 | 0       | 205                  | 223 | 223 | 0       |
| Кустарники и степи (влажные)      | 387  | 444  | 494  | 0       | 90              | 181 | 134 | 0       | 99                   | 157 | 157 | 0       |
| Низкая раст-ть (сухие)            | 427  | 376  | 377  | 0       | 34              | 30  | 32  | 0       | 170                  | 146 | 156 | 0       |
| Низкая раст-ть (влажные)          | 417  | 386  | 546  | 0       | 86              | 139 | 166 | 0       | 88                   | 128 | 177 | 0       |
| Остальные (сухие)                 | 941  | 750  | 291  | 371     | 25              | 24  | 12  | 14      | 95                   | 86  | 103 | 150     |
| Остальные (влажные)               | 442  | 419  | 397  | 321     | 82              | 167 | 106 | 89      | 80                   | 143 | 125 | 101     |
| Сухие ср.-взвеш. по всем типам    | 913  | 875  | 880  | 371     | 102             | 101 | 101 | 14      | 194                  | 199 | 196 | 150     |
| Влажные ср.-взвеш. по всем типам  | 406  | 428  | 496  | 321     | 93              | 166 | 136 | 89      | 106                  | 144 | 159 | 101     |
| Средний поток суммарных выпадений | 1320 | 1303 | 1376 | 691     | 195             | 267 | 237 | 103     | 299                  | 343 | 355 | 251     |

Среднее отношение влажных выпадений серы к сухим выпадениям над сушей составляет от 1.8 (ЦЭЗ) до 2.2 (ЗАВ). Для окисленного азота это отношение лежит в диапазоне от 0.6 (БЭЗ) до 1.1 (ЗАВ), а для восстановленного азота – от 1.2 (ЦЭЗ) до 1.8 (ЗАВ). Это отношение наиболее высокое для ЗАВ в силу двух причин. Во-первых, ЗАВ характеризуется самыми низкими суммами осадков по сравнению с другими зонами БПТ. В 2020 году осреднённая по территории ЗАВ сумма осадков составляет 530 мм, в то время как в БЭЗ эта величина равна примерно 610 мм, а для ЦЭЗ – 740 мм. Кроме того, в ЗАВ высокая растительность (леса) занимает значительно большую долю площади по сравнению с другими зонами (рис. 6).

На рис. 10 показаны вклады влажной и сухой компоненты в суммарный поток выпадения серы и азота на сгруппированные типы подстилающей поверхности в отдельных зонах БПТ. Основной вклад приходится на выпадения на леса и редколесья, чьё совместное поступление составляет 80-90%. Очевидно, что такой значительный вклад объясняется большой долей площади, занимаемой лесами и редколесьями (>70%), а также большей скоростью сухого выпадения по сравнению с другими типами подстилающей поверхности. В БЭЗ относительная площадь лесов ниже, а доля кустарников и степей – выше в сравнении с ЗАВ и ЦЭЗ, что приводит к несколько меньшему вкладу выпадений на леса в БЭЗ. Вклад группы «Остальные», в которую входят водные поверхности, городская застройка, земли, лишённые растительности и поверхности, постоянно покрытые снегом и льдом, почти незначительный (1-3%) для зон суши.



**Рисунок 10.** Вклады потоков выпадений на сгруппированные типы подстилающей поверхности в средний поток выпадений серы (а), окисленного азота (б) и восстановленного азота (в) в БПТ и величина среднего потока суммарных выпадений

**Figure 10.** Contributions of deposition fluxes to grouped land cover types to mean deposition flux of sulfur (a), oxidized nitrogen (b) and reduced nitrogen (c) in BNT and mean total deposition flux

## Дискуссия

Оценки суммарных выпадений, приведённые в табл. 3, содержат ряд неопределённостей. Во-первых, к ним относится предположение о равномерности пространственного распределения концентраций в воздухе по всей территории БПТ. В действительности, пространственное распределение будет

зависеть от расположения источников выбросов в пределах БПТ, атмосферного переноса внутри и из-за границ расчётной области, пространственной изменчивости метеорологических параметров. Другим важным источником неопределённости, ведущим к некоторой недооценке выпадений азота, является то, что не принимается в расчёт вклад  $\text{NO}_2$  в суммарные выпадения окисленного азота. Например, согласно работе Флешара и др. (Flechar et al., 2011), вклад  $\text{NO}_2$  в сухие выпадения на станциях мониторинга Европы может быть значительным, или даже преобладающим. В работе Голобоковой и др. (Golobokova et al., 2018) представлены результаты мониторинга газовой  $\text{HNO}_3$  и аэрозольной фракции  $\text{NO}_3^-$  на станции Листвянка начиная с 2000-го года, в то время как измерения  $\text{NO}_2$  доступны только для нескольких последних лет. Согласно работе Шиховцева и др. (2024), средние концентрации  $\text{NO}_2$ , измеренные на станции Листвянка с 2020 по 2023 г., составляют  $5.7 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . В работе Жамсуевой и др. (2022) представлена величина концентрации  $\text{NO}_2$  в  $1 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  как фоновая для региона Байкала, полученная в ходе экспедиционных измерений на побережье оз. Байкал. Предполагая, что разброс скоростей сухого осаждения составляет от  $0.1$  до  $0.3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  (Zhang et al., 2009), можно оценить, что недоучтённый вклад  $\text{NO}_2$  в сухие впадения может составлять от  $30$  до  $540 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ . Кроме того, неопределённости могут быть вызваны допущениями параметризаций скоростей сухого осаждения, погрешностями измерительных и метеорологических данных, и т.д. В частности, оценки скоростей сухого осаждения, полученные в данной работе, были сопоставлены с измеренными величинами или с оценками, вычисленными в ходе других исследований (табл. 4). Из таблицы следует, что скорости сухого осаждения на поверхность воды, полученные в данной работе несколько ниже, чем значения, приведенные в других работах. Для лесов и экосистем с низкой растительностью скорости сухого осаждения, приведённые в данной работе и других исследованиях, в целом, сопоставимы. Применение химико-транспортных моделей атмосферного переноса и выпадений может способствовать снижению части упомянутых неопределённостей, например тех, что обусловлены предположениями об отсутствии пространственной изменчивости концентраций в воздухе.

**Таблица 4.** Измеренные и рассчитанные скорости сухого осаждения на поверхности, покрытые лесами («Лес»), низкой растительностью («Низк. раст.») и водные поверхности («Вода»), найденные в литературных источниках и полученные в данной работе. «Изм.» обозначает измеренную, и «Расч.» – рассчитанную  $V_d$ . Значения, использованные в данной работе, представлены в виде разброса средних за месяц величин и среднегодовых за 2004-2023 г.

**Table 4.** Measured and calculated dry deposition velocity values to surfaces covered with forests («Лес»), low vegetation («Низк. раст.») and water surfaces («Вода») found in scientific literature and obtained in this work. «Изм.» denotes measured and «Расч.» denotes calculated  $V_d$  value. The values used in the current work are presented as a range of monthly mean values and mean values for the 2004-2023 period

| Веще-ства       | Тип поверх-ности | Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с <sup>-1</sup> | Примечания                                                     | Ссылки               |
|-----------------|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| SO <sub>2</sub> | Лес              | 2.1-5.9 (сред-нее 4.6)                             | Изм; хвойный лес, тёплый сезон, Канада                         | Gordon et al., 2023  |
|                 |                  | 0.1-0.6                                            | Расч.; хвойный лес, тёплый сезон, Канада                       | Gordon et al., 2023  |
|                 |                  | 3.4                                                | Изм. (самолёт); август-сентябрь 2013 г, бореальный лес, Канада | Hyden et al., 2021   |
|                 |                  | 0.16                                               | Расч.; хвойный лес                                             | Zhang et al., 2004   |
|                 |                  | 0.3– 0.9                                           | Расч.; сосновый лес                                            | Matsuda et al., 2001 |
|                 |                  | 0.59                                               | Изм; преимущественно лиственный лес, за год                    | Wu et al., 2016      |
|                 |                  | 0.2–0.6 (лето), 0.2-0.5 (зима)                     | Изм; преимущественно лиственный лес, за год                    | Wu et al., 2018      |
|                 |                  | 1.94                                               | Расч.; Типичное значение для влажных дней, хвойный лес.        | Zhang et al., 2003   |
|                 |                  | 0.86/0.74                                          | Изм/расч.; смешанный лес; май-октябрь, США                     | Zhang et al., 2002   |
|                 |                  | 0.26-2.9 (сред. 1.5)                               | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                  | Данная работа        |
|                 | Низк. раст.      | 0.25/0.40/0.34                                     | Расч.; с/х земли/луга/прерии                                   | Zhang et al., 2004   |
|                 |                  | ~ 1.0                                              | Расч.; типичное значения для влажного дня                      | Zhang et al., 2003   |
|                 |                  | 0.1- 1.2 (сред. 0.6)                               | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                  | Данная работа        |
|                 | Вода             | 0.7                                                | Расч.                                                          | Zhang et al., 2004   |
|                 |                  | 0.7 - 0.9                                          | Расч; типичные значения                                        | Zhang et al., 2003   |
|                 |                  | 0.1- 0.3 (сред. 0.2)                               | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                  | Данная работа        |

Продолжение таблицы 4

| Веще-ства        | Тип поверх-ности | Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с <sup>-1</sup> | Примечания                                                                      | Ссылки                               |
|------------------|------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                  | Лес              | 2.5 - 3.5                                          | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                             | Flechard et al., 2011                |
| HNO <sub>3</sub> |                  | 2.2 или 4.7                                        | Изм. (самолёт); август-сентябрь 2013 г, бореальный лес, Канада, шлейфы выбросов | Hyden et al. 2021                    |
|                  |                  | 2.66                                               | Расч.; хвойный лес                                                              | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                  |                  | 0.6 - 2.1                                          | Расч.; хвойный лес, Канада                                                      | Zhang et al., 2009                   |
|                  |                  | 3.4                                                | Расч.; типичное значение для влажного дня; хвойный лес                          | Zhang et al., 2003                   |
|                  |                  | 1.05 / 0.47                                        | Расч.; лиственный лес в Япо-нии, медианы для деревьев с листьями/без листьев    | Xu et al., 2021                      |
|                  |                  | 3.2 – 5.2 (сред. 3.9)                              | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                                   | Данная работа                        |
|                  | Низк. раст.      | 1 - 1.2                                            | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                             | Flechard et al., 2011                |
|                  |                  | 0.76/1.68/1.16                                     | Расч.; с/х земли/луга/прерии                                                    | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                  |                  | 1.0 -1.4                                           | Расч..., многолетнее среднее; Канада                                            | Zhang et al., 2009                   |
|                  |                  | ~1.9                                               | Расч.; типичное значение для влажного дня                                       | Zhang et al., 2003                   |
|                  |                  | 0.6 - 1.6 (сред. 1.1)                              | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                                   | Данная работа                        |
|                  | Вода             | 0.84                                               | Расч.                                                                           | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                  |                  | 0.8–1                                              | Расч.; типичные значения                                                        | Zhang et al., 2003                   |
| NH <sub>3</sub>  |                  | 0.1-0.3 (сред. 0.2)                                | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                                   | Данная работа                        |
|                  | Лес              | 0.7 - 2.5                                          | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                             | Flechard et al., 2011                |
|                  |                  | 0.2                                                | Расч.; хвойный лес                                                              | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                  |                  | 0.1- 0.6                                           | Расч.; многолетнее среднее; хвойный лес в Канаде                                | Zhang et al., 2009                   |
|                  |                  | 0.5 - 3.3 (сред. 2.2)                              | Компиляция; хвойные леса                                                        | Schrader and Brümmer, 2014           |
|                  |                  | 0.1-0.5 (сред. 0.2)                                | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                                   | Данная работа                        |
|                  | Низк. раст.      | ~0.5- 1                                            | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                             | Flechard et al., 2011                |

| Веще-ства                     | Тип поверх-ности | Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с <sup>-1</sup> | Примечания                                                | Ссылки                              |
|-------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                               |                  | 0.18/0.23/0.23                                     | Расч.; с/х земли/луга/прерии                              | Zhang et al, 2004, Jia et al, 2016  |
|                               |                  | 0.3 - 0.5                                          | Расч. многолетнее среднее, Канада                         | Zhang et al., 2009                  |
|                               |                  | 0.2 - 7.1 (сред. 1.0)                              | Компиляция данных из разных источников; сельхозугодия     | Schrader and Brümmer, 2014          |
|                               |                  | 1.5 (медиана)                                      | Изм.; вересковая пустошь; раз-ные сезоны в 1984 – 1987 г. | Duyzer, 1994                        |
|                               |                  | 0.1 – 0.3 (сред. 0.2)                              | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                             | Данная работа                       |
|                               | Вода             | 0.55                                               | Расч.                                                     | Zhang et al., 2004, Jia et al, 2016 |
|                               |                  | 0.5-0.9 (сред. 0.7)                                | Компиляция данных из разных источников                    | Schrader and Brümmer, 2014          |
|                               |                  | 0.04 – 0.3 (сред. 0.2)                             | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                             | Данная работа                       |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Лес              | 0.25                                               | Расч.; хвойный лес                                        | Zhang et al., 2004                  |
|                               |                  | 0.9/0.3                                            | Изм.; лиственный лес, лето, день/ночь                     | Matsuda et al., 2010                |
|                               |                  | 1.3/1.0                                            | Изм.; день/ночь; хвойный лес                              | Ruijgrok et al., 1997               |
|                               |                  | 0.5                                                | Изм.; лето-осень                                          | Matsuda et al., 2015                |
|                               |                  | 0.9/0.4                                            | Изм.; лиственный лес, май, Китай, день/ночь               | Zhao et al., 2017                   |
|                               |                  | 1.3/0.8                                            | Изм.; хвойный лес, май, Китай, день/ночь                  | Zhao et al., 2017                   |
|                               |                  | ~0                                                 | Расч.; лиственный лес в Япо-нии, медиана                  | Xu et al., 2021                     |
|                               |                  | 0.82                                               | Изм.; хвойный лес в Венгрии                               | Horvath, 2003                       |
|                               |                  | 0.4-0.9 (сред. 0.6)                                | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                             | Данная работа                       |
|                               | Низк. раст.      | 0.24                                               | Расч.; луг                                                | Zhang et al., 2004                  |
|                               |                  | 0.2-0.4 (сред. 0.3)                                | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                             | Данная работа                       |
|                               | Вода             | 0.26                                               | Расч.                                                     | Zhang et al., 2004                  |
|                               |                  | 0.04-0.07 (сред. 0.05)                             | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                             | Данная работа                       |

Продолжение таблицы 4

| Вещества                     | Тип поверхности | Среднее, медиана или разброс, см·с <sup>-1</sup> | Примечания                                                               | Ссылки                               |
|------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Лес             | 0.2- 2.5                                         | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                      | Flechard et al., 2011                |
|                              |                 | 0.3                                              | Расч.; хвойный лес                                                       | Zhang et al., 2004                   |
|                              |                 | 1.3/1.0                                          | Изм.; день/ночь; хвойный лес                                             | Ruijgrok et al., 1997                |
|                              |                 | 0.93/0.47                                        | Расч.; хвойный лес в Японии, медиана для деревьев с листьями/без листьев | Xu et al., 2021                      |
|                              |                 | 0.5 -1.1 (сред. 0.7)                             | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |
|                              | Низк. раст.     | ~0.1-0.2                                         | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                      | Flechard et al., 2011                |
|                              |                 | 0.25                                             | Расч.; луг                                                               | Zhang et al., 2004                   |
|                              |                 | 0.2 -0.4 (сред. 0.3)                             | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |
|                              | Вода            | 0.27                                             | Расч.                                                                    | Zhang et al., 2004                   |
|                              |                 | 0.04-0.07 (сред. 0.05)                           | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Лес             | 0.2 - 2                                          | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                      | Flechard et al., 2011                |
|                              |                 | 0.3                                              | Расч.; хвойный лес                                                       | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                              |                 | 1.3/1.0                                          | Изм.; день/ночь; хвойный лес                                             | Ruijgrok et al., 1997                |
|                              |                 | 0.84                                             | Изм.; хвойный лес в Венгрии                                              | Horvath, 2003                        |
|                              |                 | 0.4-0.8 (сред. 0.5)                              | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |
|                              | Низк.раст       | ~0.1 - 0.2                                       | Расч.; год; разброс для 4-х моделей                                      | Flechard et al., 2011                |
|                              |                 | 0.25                                             | Расч.                                                                    | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                              |                 | 0.2                                              | Изм.; вересковая пустошь; разные сезоны в 1984–1987 г.                   | Duyzer, 1994                         |
|                              |                 | 0.2-0.4 (сред. 0.3)                              | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |
|                              | Вода            | 0.27                                             | Расч.                                                                    | Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016 |
|                              |                 | 0.04 - 0.07 (сред. 0.05)                         | Ст. Листвянка, Байкал, Россия                                            | Данная работа                        |

## Выводы

Многолетние измерения концентраций в воздухе и осадках окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на станции Листвянка позволили

определить вклады сухих выпадений в суммарные выпадения на различные типы подстилающей поверхности. Вклад сухих выпадений в суммарные выпадения серы для водной поверхности, луга и хвойного леса составляет 50%, 67% и 85%, соответственно. Вклад сухих выпадений окисленного азота в суммарные выпадения сравнительно невелик для водной поверхности и луга и составляет в среднем 5% и 20%, соответственно. Для хвойных лесов вклады сухих и влажных выведений примерно равны. Вклады сухого осаждения восстановленного азота сопоставимы для всех трёх рассматриваемых типов подстилающей поверхности, и составляют в среднем 50%, 56% и 60% для водной поверхности, луга и хвойного леса, соответственно.

Потоки сухих выпадений серы и азота на станции Листвянка зависят от типа подстилающей поверхности и концентраций газовой и аэрозольной компоненты в воздухе. Потоки сухих выпадений серы (в газовой и аэрозольной фракциях) на поверхность воды почти вдвое ниже, чем потоки на травяные участки, и почти в пять раз ниже, чем на хвойный лес. Для окисленного азота разница в потоках ещё выше: отношение потоков на воду и луг составляет 4.6, а на воду и лес – почти 17 раз. В отличие от серы и окисленного азота, для восстановленного азота разница в потоках сухих выпадений на рассматриваемые типы подстилающей поверхности не столь высока: выпадения на луг выше на 30%, а на хвойный лес на 60%, чем на водную поверхность.

Предположение о равномерном распределении концентрации серы и азота в воздухе БПТ и интерполяция значений измеренных концентраций в атмосферных осадках позволили оценить осреднённые по площади потоки суммарных выпадений в разных зонах БПТ. Осреднённый поток серы на поверхность озера Байкал (около  $700 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) примерно вдвое ниже, чем поток на суше в ЦЭЗ, БЭЗ и ЗАВ ( $1300\text{--}1400 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Средний поток суммарных выпадений окисленного азота на поверхность озера Байкал ( $100 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) почти в 2-3 раза ниже, чем поток в ЗАВ ( $200 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ), БЭЗ ( $270 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) и ЦЭЗ ( $240 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Средние потоки суммарных выпадений восстановленного азота в зонах БПТ демонстрируют меньший разброс по сравнению с другими соединениями, и составляют  $250 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (Озеро Байкал),  $360 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (ЦЭЗ),  $340 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (БЭЗ) и  $300 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$  (ЗАВ).

## Список литературы

Голобокова, Л.П., Ходжер, Т.А., Ходжер, Т.В. (2007) Современная оценка сухих осадений химических веществ на подстилающую поверхность в разных районах азиатской территории России, *Оптика атмосферы и океана*, т. 20, № 6, с. 512-516.

Жамсуева, Г.С., Ходжер, Т.В., Балин, Ю.С., Заяханов, А.С., Цыдыпов, В.В., Пеннер, И.Э., Насонов, С.В., Маринайте, И.И. (2022) Экспериментальные исследования аэрозольных и газовых примесей в приводном слое атмосферы оз. Байкал (корабельная экспедиция, сентябрь 2021 г.), *Оптика атмосферы и океана*, т. 35, № 9.

Латышева, И.В., Синюкович, В.Н., Чумакова, Е.В. (2009) Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал, *Известия Иркутского государственного университета, серия «Науки о Земле»*, т. 2., № 2, с. 117-133,

*Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год.* Под ред. Черногоаевой Г.М., Росгидромет, 2025, 224 с.

Першина, Н. А., Павлова, М. Т., Полищук, А. И., Семенец, Е. С. (2021) Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016-2020 гг. (обзор данных), ФГБУ «ГГО», Санкт-Петербург, Саратов, Амирит, 114 с.

Сиховцев, М.Ю., Оболкин, В.А., Ходжер, Т.В., Моложникова, Е.В. (2023) Изменчивость приземной концентрации твердых частиц PM<sub>1</sub>–PM<sub>10</sub> в воздушном бассейне южного Прибайкалья, *Оптика атмосферы и океана*, т. 36, № 6.

Carmichael, G.R., Streets, D.G., Calori, G., Amann, M., Jacobson M.Z., Hansen, J. and Ueda, H. (2002) Changing trends in sulfur emissions in Asia: implications for acid deposition, air pollution and climate, *Environmental science and technology*, vol. 36, no. 22, pp. 4707- 4713.

Dementeva, A., Zhamsueva, G., Zayakhanov, A. and Tsydypov, V. (2022) Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region, *Atmosphere*, vol. 13, 211 p. <https://doi.org/10.3390/atmos13020211>.

Duyser, J. (1994) Dry deposition of ammonia and ammonium aerosols over heathland, *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no D9, pp. 18757-18763.

EANET (2003) *Technical Document for Filter Pack Monitoring in East Asia. Adopted by Third Session of the Science Advisory Committee (SAC3) of EANET*, Network Center for EANET.

EANET (2005) *Goal, Achievements and Way Forward*. Report for Policy Makers on EANET., EANET Secretariat/UNEP, November, 21 p.

EANET (2010) *Technical manual on dry deposition flux estimation in East Asia*, Network Center for EANET, 61 p.

Erismann, J. W. (1994) Evaluation of a surface resistance parameterization of sulfur dioxide, *Atmospheric Environment*, vol. 28, pp. 2583-2594.

Erismann, J.W., Draaijers, G.P.J., (1995) Atmospheric Deposition in Relation to Acidification and Eutrophication, *Studies in Environmental Science*, vol. 63, Elsevier, pp. 55-75.

Garrat, J.R. (1999) *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 316 p.

Flechard, C.R., Nemitz, E., Smith, R.I., Fowler, D., Vermeulen, A.T., Bleeker A., Erismann, J.W., Simpson, D., Zhang, L., Tang, Y.S., Sutton, M.A.

---

(2011) Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems, a comparison of inferential models across the NitroEurope network, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 2703-2728, [www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/](http://www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/).

Golobokova, L.P., Khodzher, T.V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Khuriganova, O.I. and Onischuk, N.A. (2018) Aerosol in the atmosphere of the Baikal region, history and contemporary researches, *Limnology and Freshwater Biology*, vol. 1, pp. 49-57, doi:10.31951/2658-3518-2018-A-1-49.

Gordon, M., Blanchard, D., Jiang, T., Makar, P.A., Staebler, R.M., Aherne, J., Mihele, C. and Zhang, X. (2023) High sulfur dioxide deposition velocities measured with the flux-gradient technique in a boreal forest in the Alberta Oil Sands Region, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 7241-7255, <https://doi.org/10.5194/acp-23-7241-2023>.

Gromov, S.A., Ginzburg, V.A., Paramonov, S.G. (2006) Russian governmental monitoring networks related to acid deposition and results of their activities over east Asian territory, *EANET Science Bulletin. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET)*, November 2006, vol. 1, p. 141-152.

Hayden, K., Li, S-M., Makar, P., Liggio, J., Moussa, S.G., Akingunola, A., McLaren, R., Staebler, R.M., Darlington, A., O'Brien, J., Zhang, J., Wolde, M. and Zhang, L. (2021) New methodology shows short atmospheric lifetimes of oxidized sulfur and nitrogen due to dry deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 8377-8392, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8377-2021>.

Horvath, L. (2003) Dry deposition velocity of PM<sub>2.5</sub> ammonium sulfate particles to a Norway spruce forest on the basis of S- and N-balance estimations, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4419-4424.

Jacobson, M. (1999) *Fundamentals of atmospheric modeling*, Cambridge university press, 656 p.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C. and Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements, *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep19810.

Kaimal, J.C., Finnigan, J.J. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 289 p.

Khan, T.R. and Perlinger J.A. (2017) Evaluation of five dry particle deposition parameterizations for incorporation into atmospheric transport models, *Geosci. Model Dev.*, vol. 10, pp. 3861-3888.

Kouraev, A., Swmowski, S.V., Shimaraev, M.N., Mognard, N.M., Legrisy, B. and Rmy, F. (2007) The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data. Relationship to air temperature, dynamical, and other factors, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 52(3), pp. 1268-1286.

Kouznetsov, R., and Sofiev, M. (2012) A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, D01202.

Matsuda, K., Aoki, M., Zhang, S., Kominami, T., Fukuyama, T., Fukuzaki, N. and Totsuka T. (2001) Dry deposition velocity of sulfur dioxides on a red pine forest in Nagano, Japan, *J. Jpn., Soc. Atmos. Environ.*, vol. 37(6), pp. 387-392.

Matsuda, K., Fujimura, Y., Hayashi, K., Takahashi, A. and Nakaya, K. (2010) Deposition velocity of PM<sub>2.5</sub> sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 4582-4587.

Matsuda, K., Watanabe, I., Mizukami, K., Ban, S. and Takahashi, A. (2015) Dry deposition of PM<sub>2.5</sub> sulfate above a hilly forest using relaxed eddy accumulation, *Atmospheric Environment*, vol. 107, pp. 255-261.

Muñoz Sabater, J. (2019) *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi 10.24381/cds.e2161bac (Accessed on 20-Jul-2025).

Petrov, A. and Zhang, L. (2010) Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models, *Geosci. Model Dev.*, 3, pp. 753-769.

Pleim, J. and Ran, L. (2011) Surface Flux Modeling for Air Quality Applications, *Atmosphere*, vol. 2, pp. 271-302.

Popovicheva, O., Molozhnikova, E., Nasonov, S., Potemkin, V., Penner, I., Klemasheva, M., Marinaite, I., Golobokova, L., Vratolis, S., Eleftheriadis, K. and Khodzher, T. (2021) Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal, *Journal of Environmental Science*, vol. 107, pp. 49-64.

Ruijgrok, W., Tieben, H., Eisinga, P., (1997) The dry deposition of particles to a forest canopy: a comparison of model and experimental results, *Atmospheric Environment*, vol. 31, pp. 399-415.

Schrader, F. and Bmmmer, C. (2014) Land use specific ammonia deposition velocities: a review of recent studies (2004-2013), *Water Air Soil Pollut.*, vol. 225, p. 2114, doi: 10.1007/s11270-014-2114-7.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley Interscience Publication, 1120 p.

Shikhovtsev, M. Y., Molozhnikova, Y. V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Lutskin, E.S., and Khodzher, T. V. (2024) Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia), *Appl. Sci.*, vol. 14, p. 8327, <https://doi.org/10.3390/app14188327>.

Shikhovtsev, M.Yu., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Molozhnikova, Ye.V. (2023) Variability of the ground concentration of particulate particles PM<sub>1</sub> – PM<sub>10</sub> in the air basin of the southern Baikal region, *Atmos. Ocean. Opt.*, vol. 36, no. 6. pp. 448-454.

Slinn, S.A. and Slinn, W.G.N. (1980) Predictions for particle deposition on natural waters, *Atmospheric Environment*, vol.14., pp. 103-1016.

---

Smith, R. I., Fowler, D., Sutton, M. A., Flechard, C., Coyle, M., (2000) Regional estimation of pollutant gas dry deposition in the UK, model description, sensitivity analyses and outputs, *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp. 3757-3777.

*Strategy Paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET* (2011-2015) [Second Edition] (2010) Network Center for EANET, October 2010, 15 p.

Sulla-Menashe, D. and Friedl, M.A. (2018) *User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product?* 18 p.

Williams, R.M. (1982) A model for the dry deposition of particles to natural water surfacesm, *Atmospheric Environment*, vol.16, no.8, pp 1933-1938.

Wu, Z., Staebler, R., Vet, R. and Zhang, L. (2016) Dry deposition of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> estimated from gradient measurements above a temperate mixed forest, *Environmental Pollution*, pp. 202-210.

Wu, Z., Schwede, D.B., Ve,t R., Walker, J.T., Shaw, M., Staebler, R. and Zhang, L. (2018) Evaluation and intercomparison of five North American dry deposition algorithms at a mixed forest site, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 10, pp. 1571-1586, <https://doi.org/10.1029/2017MS001231>.

Xu, M., Kasahara, K., Sorimachi, A. and Matsuda, K. (2021) *Nitric acid dry deposition associated with equilibrium shift of ammonium nitrate above a forest by long-term measurement using relaxed eddy accumulation*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118454>.

Yang, Y., Mou, S., Wang, H., Wang, P., Li, B. and Liao, H. (2024) Global source apportionment of aerosols into major emission regions and sectors over 1850-2017, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 24, pp. 6509-6523.

Zhang, L., Brook, J.R. and Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 3, pp. 2067-2082, [www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/](http://www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/).

Zhang, L., He, Z. (2014) Technical Note. An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 14, pp. 3729-3737.

Zhang, L., Gong, S., Padro, J. and Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 549-560.

Zhang, L., Moran, M.D., Makar, P.A., Brook, J.R. and Gong, S. (2002) Modelling gaseous dry deposition in AURAMS, a unified regional air-quality modelling system, *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 537-560.

Zhang, L. and Shao, Y. (2014) A new parameterization of particle dry deposition over rough surfaces, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 12429-12440.

Zhang, L., Vet, R., O'Brien, J.M., Mihele, C., Liang, Z. and Wiebe, A. (2009) Dry deposition of individual nitrogen species at eight Canadian rural sites, *Journal*

Zhang, Y., Wang, T. J., Hu, Z. Y. and Xu, C. K. (2004) Temporal variety and spatial distribution of dry deposition velocities of typical air pollutants over different land use types, *Climatic and Environmental Research*, no. 9, pp. 591-604.

Zhao, L., Lun, X., Li, R., Gao, Y., Sun, F. and Xu, X. (2017) Deposition of PM<sub>2.5</sub> Sulfate in the Spring on Urban Forests in Beijing, China, *Atmosphere*, no. 8, p. 3, doi:10.3390/atmos8010003.

## References

Golobokova L.P., Khodzher T.A., Khodzher T.V. (2007) Sovremennaya otsenka sukhikh osazhdeniy khmicheskikh veschestv na podstilayushuyu poverkhnost v raznykh rayonah aziatskoy territorii Rossii [Present-day estimate of chemical species dry deposition to the underlying surface in different regions of Asian part of Russia], *Atmospheric and ocean optics*, 20, no. 6, pp. 512-516.

Zhamsuyeva G.S., Khodzher T.V., Balin Y.S., Zayakhanov A.S., Tsydypov V.V., Penner I.E., Nasonov S.V., Marinaite I.I. (2022) Experimentalnye issledovaniya aeroliznykh i gasovykh promesey v provodnom sloye atmosfery oz. Baikal (korabelnaya ekspeditsiya, sentiabr 2021 g.) [Experimental research of particulate and gaseous species in near-water atmospheric layer of Lake Baikal (seaborn expedition, September 2021)], *Atmospheric and ocean optics*, 35, no. 9.

Latysheva I.V., Sinukovich V.N., Chumakova E.V. (2009) Sovremennyye osobennosti gidrometeorologicheskogo rejima yuzhnogo poberezh'ya oz. Baikal. [Modern peculiarities of hydrometeorological mode of the Lake Baikal southern coast]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, seria "Nauki o Zemle"*, vol. 2, no. 2, pp. 117-133.

*Obzor sostoyaniya i zagriazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2024 god.* [Review of environmental state and pollution in Russian Federation in 2024] (2025) in Chernogaeva G.M. (ed.), *Rosgidromet*, 2025, 224 p.

Pershina N.A., Pavlova M.T., Polischuk A.I., Semenets, E.S. (2021) Yezhegodnye dannye po khimicheskomy sostavy i kislotnosty atmosferykh osadkov za 2016- 2020 gg. (obzor dannykh) [Annual data on atmospheric precipitation chemical composition and acidity in 2016- 2020 (data review)]. FGBU "GGO", St-Petersburg, Saratov, Amirit, 114 p.

Shikhovtsev M.U., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova E.V. (2023) Izmenchivost' prizemnoy koncentracii tvordykh chastits PM<sub>1</sub> – PM<sub>10</sub> v vozdushnom bassejne yuzhnogo Probaikalia [Variability of surface concentrations of PM<sub>1</sub> – PM<sub>10</sub> particulate matter in air of the southern Baikal region], *Atmospheric and ocean optics*, vol. 36, no. 6.

Carmichael, G.R., Streets, D.G., Calori, G., Amann, M., Jacobson M.Z., Hansen, J. and Ueda, H. (2002) Changing trends in sulfur emissions in Asia: implications for acid deposition, air pollution and climate, *Environmental science and technology*, vol. 36, no. 22, pp. 4707- 4713.

Dementeva, A., Zhamsueva, G., Zayakhanov, A. and Tsydypov, V. (2022) Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region, *Atmosphere*, vol. 13, 211 p. <https://doi.org/10.3390/atmos13020211>.

Duyser, J. (1994) Dry deposition of ammonia and ammonium aerosols over heathland, *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no D9, pp. 18757-18763.

EANET (2003) *Technical Document for Filter Pack Monitoring in East Asia. Adopted by Third Session of the Science Advisory Committee (SAC3) of EANET*, Network Center for EANET.

EANET (2005) *Goal, Achievements and Way Forward*. Report for Policy Makers on EANET. EANET Secretariat/UNEP, November, 21 p.

EANET (2010) *Technical manual on dry deposition flux estimation in East Asia*, Network Center for EANET, 61 p.

Erismann, J. W. (1994) Evaluation of a surface resistance parameterization of sulfur dioxide, *Atmospheric Environment*, vol. 28, pp. 2583-2594.

Erismann, J.W., Draaijers, G.P.J., (1995) Atmospheric Deposition in Relation to Acidification and Eutrophication, *Studies in Environmental Science*, vol. 63, Elsevier, pp. 55-75.

Garrat, J.R. (1999) *The atmospheric boundary layer*, Cambridge University Press, 316 p.

Flechard, C.R., Nemitz, E., Smith, R.I., Fowler, D., Vermeulen, A.T., Bleeker, A., Erismann, J.W., Simpson, D., Zhang, L., Tang, Y.S. and Sutton, M.A. (2011) Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems, a comparison of inferential models across the NitroEurope network, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 2703-2728, [www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/](http://www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/).

Golobokova, L.P., Khodzher, T.V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Khuriganova, O.I. and Onischuk, N.A., (2018) Aerosol in the atmosphere of the Baikal region, history and contemporary researches, *Limnology and Freshwater Biology*, vol. 1, pp. 49-57, doi:10.31951/2658-3518-2018-A-1-49.

Gordon, M., Blanchard, D., Jiang, T., Makar, P.A., Staebler, R.M., Aherne, J., Mihele, C. and Zhang, X. (2023) High sulfur dioxide deposition velocities measured with the flux–gradient technique in a boreal forest in the Alberta Oil Sands Region, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 7241-7255, <https://doi.org/10.5194/acp-23-7241-2023>.

Gromov, S.A., Ginzburg, V.A. and Paramonov, S.G. (2006) Russian governmental monitoring networks related to acid deposition and results of their activities over east Asian territory, *EANET Science Bulletin*. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), November 2006, vol. 1, p. 141-152.

Hayden, K., Li, S-M., Makar, P., Liggio, J., Moussa, S.G., Akingunola, A., McLaren, R., Staebler, R.M., Darlington, A., O'Brien, J., Zhang, J., Wolde, M. and Zhang, L. (2021) New methodology shows short atmospheric lifetimes of oxidized

---

sulfur and nitrogen due to dry deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 8377-8392, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8377-2021>.

Horvath, L. (2003) Dry deposition velocity of PM<sub>2.5</sub> ammonium sulfate particles to a Norway spruce forest on the basis of S- and N-balance estimations, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4419-4424

Jacobson, M. (1999) *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge university press, 656 p.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C. and Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep19810.

Kaimal, J.C., Finnigan, J.J. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 289 p.

Khan, T.R. and Perlinger J.A. (2017) Evaluation of five dry particle deposition parameterizations for incorporation into atmospheric transport models, *Geosci. Model Dev.*, vol. 10, pp. 3861-3888.

Kouraev, A., Swmowski, S.V., Shimaraev, M.N., Mognard, N.M., Légrésy, B. and Rémy, F. (2007) The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data. Relationship to air temperature, dynamical, and other factors, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 52(3), pp. 1268-1286.

Kouznetsov, R., and Sofiev, M. (2012) A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, D01202.

Matsuda, K., Aoki, M., Zhang, S., Kominami, T., Fukuyama, T., Fukuzaki, N. and Totsuka T. (2001) Dry deposition velocity of sulfur dioxides on a red pine forest in Nagano, Japan, *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, vol. 37(6), pp. 387-392.

Matsuda, K., Fujimura, Y., Hayashi, K., Takahashi, A. and Nakaya, K. (2010) Deposition velocity of PM<sub>2.5</sub> sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 4582-4587.

Matsuda, K., Watanabe, I., Mizukami, K., Ban, S. and Takahashi, A. (2015) Dry deposition of PM<sub>2.5</sub> sulfate above a hilly forest using relaxed eddy accumulation, *Atmospheric Environment*, vol. 107, pp. 255-261.

Muñoz Sabater, J. (2019) *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.e2161bac (Accessed on 20-Jul-2025).

Petrov, A. and Zhang, L. (2010) Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models, *Geosci. Model Dev.*, 3, pp. 753-769.

Pleim, J. and Ran, L. (2011) Surface Flux Modeling for Air Quality Applications, *Atmosphere*, vol. 2, pp. 271-302.

---

Popovicheva, O., Molozhnikova, E., Nasonov, S., Potemkin, V., Penner, I., Klemasheva, M., Marinaite, I., Golobokova, L., Vratolis, S., Eleftheriadis, K. and Khodzher, T. (2021) Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal, *Journal of Environmental Science*, vol. 107, pp. 49-64.

Ruijgrok, W., Tieben, H., Eisinga, P., (1997) The dry deposition of particles to a forest canopy: a comparison of model and experimental results, *Atmospheric Environment*, vol. 31, pp. 399-415.

Schrader, F. and Brümmer, C. (2014) Land use specific ammonia deposition velocities: a review of recent studies (2004-2013), *Water Air Soil Pollut*, vol. 225, p. 2114, doi: 10.1007/s11270-014-2114-7.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley Interscience Publication, 1120 p.

Shikhovtsev, M. Y, Molozhnikova, Y. V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Lutskin, E.S., and Khodzher, T. V. (2024) Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia), *Appl. Sci.*, vol. 14, p. 8327, <https://doi.org/10.3390/app14188327>.

Shikhovtsev, M.Yu., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Molozhnikova, Ye.V. (2023) Variability of the ground concentration of particulate particles PM1 – PM10 in the air basin of the southern Baikal region, *Atmos. Ocean. Opt.*, vol. 36, no. 6. pp. 448-454.

Slinn, S.A. and Slinn, W.G.N. (1980) Predictions for particle deposition on natural waters, *Atmospheric Environment*, vol.14, pp. 103-1016.

Smith, R. I., Fowler, D., Sutton, M. A., Flechard, C., Coyle, M., (2000) Regional estimation of pollutant gas dry deposition in the UK, model description, sensitivity analyses and outputs, *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp. 3757-3777.

Strategy Paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET (2011-2015) [Second Edition] (2010) Network Center for EANET, October 2010, 15 p.

Sulla-Menashe, D. and Friedl, M.A. (2018) User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product, 18 p.

Williams, R.M. (1982) A model for the dry deposition of particles to natural water surfaces, *Atmospheric Environment*, vol. 16, no. 8, pp. 1933-1938.

Wu, Z., Staebler, R., Vet, R. and Zhang, L. (2016) Dry deposition of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> estimated from gradient measurements above a temperate mixed forest, *Environmental Pollution*, pp. 202-210.

Wu, Z., Schwede, D.B., Ve,t R., Walker, J.T., Shaw, M., Staebler, R. and Zhang, L. (2018) Evaluation and intercomparison of five North American dry deposition algorithms at a mixed forest site, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 10, pp. 1571-1586, <https://doi.org/10.1029/2017MS001231>.

---

Xu, M., Kasahara, K., Sorimachi, A. and Matsuda, K. (2021) *Nitric acid dry deposition associated with equilibrium shift of ammonium nitrate above a forest by long-term measurement using relaxed eddy accumulation*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118454>.

Yang, Y., Mou, S., Wang, H., Wang, P., Li, B. and Liao, H. (2024) Global source apportionment of aerosols into major emission regions and sectors over 1850-2017, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 24, pp. 6509-6523.

Zhang, L., Brook, J.R. and Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 3, pp. 2067-2082, [www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/](http://www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/).

Zhang, L., He, Z. (2014) Technical Note. An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 14, pp. 3729-3737.

Zhang, L., Gong, S., Padro, J. and Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 549-560.

Zhang, L., Moran, M.D., Makar, P.A., Brook, J.R. and Gong, S. (2002) Modelling gaseous dry deposition in AURAMS, a unified regional air-quality modelling system, *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 537-560.

Zhang, L. and Shao, Y. (2014) A new parameterization of particle dry deposition over rough surfaces, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 12429-12440.

Zhang, L., Vet, R., O'Brien, J.M., Mihele, C., Liang, Z. and Wiebe, A. (2009) Dry deposition of individual nitrogen species at eight Canadian rural sites, *Journal Of Geophysical Research*, vol. 114, D02301, doi:10.1029/2008JD010640.

Zhang, Y., Wang, T. J., Hu, Z. Y. and Xu, C. K. (2004) Temporal variety and spatial distribution of dry deposition velocities of typical air pollutants over different land use types, *Climatic and Environmental Research*, no. 9, pp. 591-604.

Zhao, L., Lun, X., Li, R., Gao, Y., Sun, F. and Xu, X. (2017) Deposition of PM<sub>2.5</sub> Sulfate in the Spring on Urban Forests in Beijing, China, *Atmosphere*, no. 8, p. 3; doi:10.3390/atmos8010003.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.04.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 04.05.2026.

### Для цитирования / For citation:

Ильин, И.С., Галушин, Д.А., Громов, С. А., Жигачёва, Е.С. (2026), *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 81-118, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-81-118.

Ilyin, I.S., Galushin, D.A., Gromov, S.A., Zhigacheva, E.S. (2026) Model estimates of atmospheric deposition of sulfur and nitrogen compounds to Baikal Natural Territory based on observed concentration in air and precipitation, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 81-118, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-81-118.

# **Восстановление нарушенных земель: использование автохтонных почв для создания зонального разнообразия в искусственных насаждениях**

*А.В. Климов<sup>1)</sup>, Е.Е. Перфильев<sup>1)</sup>, К.В. Стадникова<sup>1)</sup>, И.О. Тихонова<sup>2)</sup> \**

<sup>1)</sup> ООО «ИнЭКА-консалтинг»,  
Российская Федерация, 654079, Кемеровская область, г. Новокузнецк, а/я 2386

<sup>2)</sup> ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики»,  
Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, Олимпийский проспект, д. 42

\* Адрес для переписки: *iritimay@gmail.com*

**Реферат.** В статье обсуждаются основные подходы к рекультивации земель, нарушенных в ходе добычи угля открытым способом. Авторы обсуждают существующую систему документов по стандартизации, устанавливающую правила проведения рекультивации, состоящие из технического и биологического этапа. В ситуационном исследовании, посвященном повышению эффективности сохранения и восстановления биологического разнообразия в регионах с открытой угледобычей на примере искусственного сорокалетнего соснового насаждения, приуроченного к подтайге восточной окраины Кузнецкой котловины, впервые проводился эксперимент по корректровке восстановительных сукцессий в искусственном сосновом насаждении. Результаты эксперимента показали, что на исследуемых участках структура растительного покрова и флористический состав соснового насаждения на протяжении пяти лет претерпели значительные качественные и количественные изменения, то есть на участках наблюдения отмечена восстановительная сукцессия лесного типа.

**Ключевые слова.** Рекультивация, биологический этап, восстановительная сукцессия, добыча угля, динамика флористического состава травостоя, стандартизация, наилучшие доступные технологии.

## **Disturbed Land Remediation: Using Indigenous Soils to Create Zonal Diversity in Artificial Canopies**

*A. V. Klimov<sup>1)</sup>, E. E. Perfilov<sup>1)</sup>, K. V. Stadnikova<sup>1)</sup>, I. O. Tikhonova<sup>2)</sup> \**

<sup>1)</sup> InEkA-consulting LLC,  
654079, Kemerovo Region, Novokuznetsk, P.O. Box 2386, Russian Federation

<sup>2)</sup> Federal State Autonomous Institution "Research Institute  
"Environmental Industrial Policy Centre",  
42, Olympic Avenue, Mytishchi, 141006, Moscow Region, Russian Federation

\* Correspondence address: *iritimay@gmail.com*

**Abstract.** The article discusses the main approaches to the remediation of territories disturbed by opencast coal mining. The authors discuss the existing standardization system establishing the remediation approaches including technical and biological stages. The case study was performed for increasing the efficiency of conservation and restoration of biological diversity in regions with opencast coal mining using the example of an artificial forty-year-old pine plantation confined to the subtaiga of the eastern edge of the Kuznetsk Basin, an experiment was conducted to adjust the restorative successions in an artificial pine plantation. The results of the experiment showed that in the studied areas the structure of the vegetation cover and the floristic composition of the pine plantation underwent significant qualitative and quantitative changes over five years, that is, a restorative succession of the forest type was noted in the observation areas.

**Keywords.** Remediation, biological stage, restorative succession, coal mining, dynamics of the floristic composition of grass stand, standardisation, best available techniques.

## Введение

Проблемы рекультивации нарушенных земель, сохранения и восстановления биологического разнообразия крайне актуальны для многих промышленно развитых территорий, например, Кузбасса (Куприянов и др., 2010).

В зависимости от условий залегания угольных и рудных месторождений и мощности залежей их разработку осуществляют открытым (разрезы или карьеры), подземным (рудники или шахты) или комбинированным открыто-подземным способами. В настоящее время открытым способом добывается около 90% бурых углей, 20% каменных углей, 70% руд черных и цветных металлов. Выбор способа добычи полезного ископаемого – открытого или подземного – определяется горно-геологическими условиями залегания полезных ископаемых и обосновывается технико-экономическими расчетами<sup>1)</sup>.

Угледобыча открытым способом порождает массу сопряженных проблем, в частности, ведет к полному уничтожению природных экосистем на значительной территории и фрагментации оставшихся, порождает проблему сохранения и складирования почвенного слоя и необходимость осуществления компенсационного лесовосстановления.

Рекультивация земель – комплекс мероприятий, направленных на восстановление утраченного качественного состояния земель, достаточного для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием<sup>2)</sup>.

Разработка проектов рекультивации должна производиться с учетом<sup>3)</sup>:

---

<sup>1)</sup> ИТС 16 – 2023 «Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы».

<sup>2)</sup> ГОСТ Р 59070-2020 Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель. Термины и определения.

<sup>3)</sup> ГОСТ Р 59057-2020 Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель.

---

- природных условий района (климатических, геологических, гидрогеологических, вегетационных);

- фактического состояния нарушенных земель к моменту рекультивации (площади, формы техногенного рельефа, степени естественного зарастания, современного и перспективного использования нарушенных земель, наличия потенциально-плодородных слоев почв, характера эрозионных процессов, уровня загрязнения почвы);

- показателей химического и гранулометрического состава, агрохимических и агрофизических свойств, инженерно-геологической характеристики грунтов<sup>4)</sup>;

- хозяйственных, социально-экономических и санитарно-гигиенических условий района размещения нарушенных земель.

Направление рекультивации нарушенных земель выбирают с учетом характера нарушения земель, эколого-экономической целесообразности восстановления их качественного состояния для дальнейшего целевого назначения и разрешенного использования (Скобелев, 2025; Гусева, Тихонова, 2025).

Направления рекультивации в зависимости от видов последующего использования в народном хозяйстве представлены в табл. 1.

Выбранное направление рекультивации должно с наибольшим эффектом и наименьшими затратами обеспечивать решение задач рационального и комплексного использования земельных ресурсов района, создания гармоничных ландшафтов, отвечающих экологическим, хозяйственным, эстетическим и санитарно-гигиеническим требованиям.

Согласно ГОСТ Р 59057-2020 в районах с наличием плодородных почв и благоприятными природными условиями, где возможно производство сельскохозяйственной продукции, рекультивация земель должна вестись преимущественно в сельскохозяйственном направлении. Земельные участки в составе земель лесного фонда преимущественно подлежат лесохозяйственному направлению рекультивации. Главным условием лесохозяйственного направления рекультивации является создание оптимальных лесорастительных условий для формирования древесных насаждений с одной или несколькими лесобразующими породами.

Рекультивация нарушенных земель должна проводиться в два этапа<sup>5)</sup>:

- технический этап рекультивации нарушенных земель и земельных участков (техническая рекультивация земель и земельных участков), включающий мероприятия по подготовке поверхности для проведения биологического этапа с учетом выбранного направления рекультивации и в соответствии с последующим целевым назначением и разрешенным использованием земель;

---

<sup>4)</sup> ГОСТ 17.5.1.03-86 «Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель».

<sup>5)</sup> ГОСТ Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия».

---

– биологический этап рекультивации нарушенных земель и земельных участков (биологическая рекультивация земель и земельных участков), включающий комплекс агротехнических, биологических и фитомелиоративных мероприятий по восстановлению утраченного качественного состояния земель (в том числе плодородия) с учетом выбранного направления рекультивации для определенного целевого назначения и разрешенного использования земель. В идеальном варианте предполагается, что еще при начале разработки месторождения следует снимать плодородный слой почвы и хранить его буртах в течение всего срока эксплуатации (в течение 20 лет<sup>6)</sup>) – до наступления этапа рекультивации нарушенных земель.

**Таблица 1.** Классификация нарушенных земель по направлениям рекультивации в зависимости от видов последующего использования<sup>7)</sup>

**Table 1.** Classification of disturbed lands depending on the types of subsequent use

| <b>Группа нарушенных земель по направлениям рекультивации</b>               | <b>Вид использования рекультивированных земель</b>                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Земли сельскохозяйственного направления рекультивации                       | Пашни, сенокосы, пастбища, многолетние насаждения                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Земли лесохозяйственного направления рекультивации                          | Лесонасаждения общего хозяйственного и полезащитного назначения, лесопитомники                                                                                                                                                                                                                         |
| Земли водохозяйственного направления рекультивации                          | Водоемы для хозяйственно-бытовых, промышленных нужд, орошения и рыбоводческие                                                                                                                                                                                                                          |
| Земли рекреационного направления рекультивации                              | Зоны отдыха и спорта: парки и лесопарки, водоемы для оздоровительных целей, охотничьи угодья, туристические базы и спортивные сооружения                                                                                                                                                               |
| Земли природоохранного и санитарно-гигиенического направлений рекультивации | Участки природоохранного назначения: противозерозийные лесонасаждения, задернованные или обводненные участки, участки, закрепленные или законсервированные техническими средствами, участки самозарастания – специально не благоустраиваемые для использования в хозяйственных или рекреационных целях |
| Земли строительного направления рекультивации                               | Площадки для промышленного, гражданского и прочего строительства, включая размещение отвалов отходов производства (горных пород, строительного мусора и др.)                                                                                                                                           |

<sup>6)</sup> ГОСТ 17.4.3.02-85 «Охрана природы. Почвы. Требования к охране плодородного слоя почвы при производстве земляных работ».

<sup>7)</sup> ГОСТ Р 59060-2020 Охрана окружающей среды. Земли. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации.

В информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ) 37-2023 «Добыча и обогащение угля»<sup>8)</sup> технический и биологический этапы описаны как ключевые НДТ области рекультивации нарушенных добычей угля территорий (НДТ 35 и 36 соответственно). Особо отмечается, что применение данных НДТ позволяет ускорить процесс восстановления плодородия и хозяйственной ценности земель при сокращении затрат на проведение рекультивации; их применение дает возможность заново использовать ранее изъятые для добычи угля участки земли для сельскохозяйственных или иных видов деятельности. Кроме того, биологическая рекультивация может быть начальным этапом восстановления лесных угодий, она препятствует эрозии почвы после этапа технической рекультивации, а также снижает пыление.

Для решения проблемы рекультивации отвалов вскрышных горных пород, выводимых из производственного цикла угледобычи, в 2025 разработаны два новых стандарта – ГОСТ Р 72032-2025<sup>9)</sup> «Биологическое разнообразие. Реконструкция геологической среды и жизнеспособного почвенно-растительного слоя на отвалах горных пород. Основные положения» и ГОСТ Р 72033-2025<sup>10)</sup> «Биологическое разнообразие. Реставрация лесной растительности на отвалах горных пород. Основные положения».

Одним из возможных подходов, рекомендованных данными стандартами, является транслокация почвенно-растительного слоя с ненарушенного земельного участка, переведенного в категорию «земли промышленности», на подготовленную поверхность отвала горных пород, минуя стадию буртования плодородного слоя почвы, в целях сохранения благоприятных почвенно-экологических характеристик и живых семязачатков всего комплекса видов растений, а также ускоренного восстановления биологического разнообразия и народно-хозяйственной ценности нарушенных земель. При этом в процессе единовременного перемещения почвенно-растительного слоя остаются жизнеспособными почвенные микробоценозы, а также педобионты — почвенные беспозвоночные животные, которые неизбежно погибают при буртовании.

Однако в ГОСТ Р 72032-2025 представлены лишь рекомендованные мероприятия технического этапа рекультивации:

- планировка поверхности нарушенных земель с уклонами не более 3°;
- нанесение на поверхность отвала вскрыши насыпного слоя потенциально-плодородных пород, представленных четвертичными осадочными породами в виде лессовидных суглинков и глин, являющихся частью вскрышных горных пород.

---

<sup>8)</sup> ИТС 37-2023 «Добыча и обогащение угля».

<sup>9)</sup> ГОСТ Р 72032-2025 «Биологическое разнообразие. Реконструкция геологической среды и жизнеспособного почвенно-растительного слоя на отвалах горных пород. Основные положения».

<sup>10)</sup> ГОСТ Р 72033-2025 «Биологическое разнообразие. Реставрация лесной растительности на отвалах горных пород. Основные положения».

В свою очередь, в ГОСТ Р 72033-2025 представлены мероприятия в части агротехники создания лесных насаждений на рекультивируемых землях, так, например, для восстановления на отвалах горно-таежной подзоны рекомендуются таежные лесные культуры – в качестве основной древесной породы предпочтительно использовать кедр сибирский, в качестве сопутствующих – ель сибирскую и лиственницу сибирскую.

Однако при длительном хранении такой сложный компонент экосистемы, как почва, быстро теряет плодородие (Bosch-Serra et al., 2023) и утрачивает естественную структуру. Компенсационное лесовосстановление в Кузбассе, как и в целом создание искусственных древесных насаждений, нередко проводится на нелесных землях, с широким применением в качестве доминирующей породы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Однако она слабо фитоценотически связана с современным растительным покровом региона и часто становится причиной торможения восстановительных сукцессий. Как результат, многие искусственные сосновые насаждения не представляют собой сложившиеся или даже формирующиеся сообщества, близкие к коренным формациям. Напротив, в зависимости от плотности исходных посадок, сосняки нередко мертвопокровные или с травостоем из однолетних сорно-синантропных растений.

Одним из решений отмеченной проблемы является создание условий для протекания восстановительной сукцессии в искусственных насаждениях по пути формирования сообществ, близких к коренным. Поскольку одним из основных индикаторов, отражающих динамику растительного покрова, является видовой состав, цель настоящей работы состоит в том, чтобы проследить этапы восстановления нарушенных земель и рассмотреть результаты изменения флористического состава травостоя территории с привнесением в сосновые насаждения почвенного слоя с содержащимися в нем диаспорами с участков, отводимых под угледобычу.

### **Характеристика восстанавливаемого участка**

В 2018-2023 гг. сотрудниками ООО «ИнЭкА-консалтинг» в рамках программы сохранения биологического разнообразия проводился эксперимент для корректировки восстановительной сукцессии в искусственном сосновом насаждении. Предварительные исследования показали отсутствие динамики в составе его травяного яруса.

Участок-донор переноса почвы приурочен к подзоне черневой тайги юга Кузнецкого Алатау и характеризуется развитием типичных для нее осиново-пихтовых папоротниково-высокотравных сообществ (Лацинский, 2009) (рис. 1). Флора травостоя территории включала 206 видов высших сосудистых растений, относящихся к 46 семействам и 138 родам. Среднее число видов в семействе составило 4.47. Число одно- и двулетних растений – 19 видов (9.22%). Спектр ведущих семейств *Asteraceae* (22), *Poaceae* (20), *Rosaceae* (19), *Fabaceae* (17) и *Ranunculaceae* (16).

Искусственное 40-летнее сосновое насаждение, в которое осуществлялся перенос почвы, приурочено к предгорной подтайге, на восточной окраине Кузнецкой котловины. В составе искусственного насаждения (10С + Б) доминирует сосна обыкновенная с примесью березы, не превышающей 1 ед. Полнота древостоя – 0.55, средняя высота – 19.6 м, средний диаметр – 20.2 см, возраст – 40 лет, IА класса бонитета. Схема размещения сосны – ленточная, по четыре-пять рядов в кулисе, разделенных межкулисным пространством, шириной 3.5-5 м. (рис. 2).



**Рисунок 1.** Участок-донор почв с развитыми сообществами черневой тайги  
(составлен авторами)

**Figure 1.** Soil donor site with developed communities of *Abies sibirica* dominated taiga  
(compiled by the authors)



**Рисунок 2.** Искусственное 40-летнее сосновое насаждение  
(составлен авторами)

**Figure 2.** Artificial 40-year pinery  
(compiled by the authors)

На участке переноса было заложено 4 постоянных геоботанических площадки площадью 625 м<sup>2</sup>, на которых осуществляли геоботанические описания по общепринятой методике (Миркин и др., 2001; Отмахов и др., 2018), на всей территории с той же периодичностью проводились маршрутные флористические исследования.

В конце вегетационного сезона 2018 года в межкулисное пространство был осуществлен перенос верхней свежеснятой части почвенного профиля мощностью 25 см, с содержащимся в нем комплексом диаспор.

### Динамика флористического состава травостоя

Перед экспериментом в 2018 году травостой участка исследований насчитывал 44 вида высших сосудистых растений (рис. 3). Это была агрегация, образованная преимущественно сорными одно- и двухлетними растениями (рис. 4). Среднее число видов в семействе в 2018 г. составило 2.44. Семейств с видовой насыщенностью выше среднего показателя было два: *Asteraceae* (11 видов) и *Lamiaceae* (4 вида).

В 2019 и 2020 гг. в результате перемещения почвенно-грунтового слоя с диаспорами растений черневой тайги наблюдается резкое увеличение флористического разнообразия, со стабилизацией в 2021-2022 гг. и возобновлением роста в 2023 г.

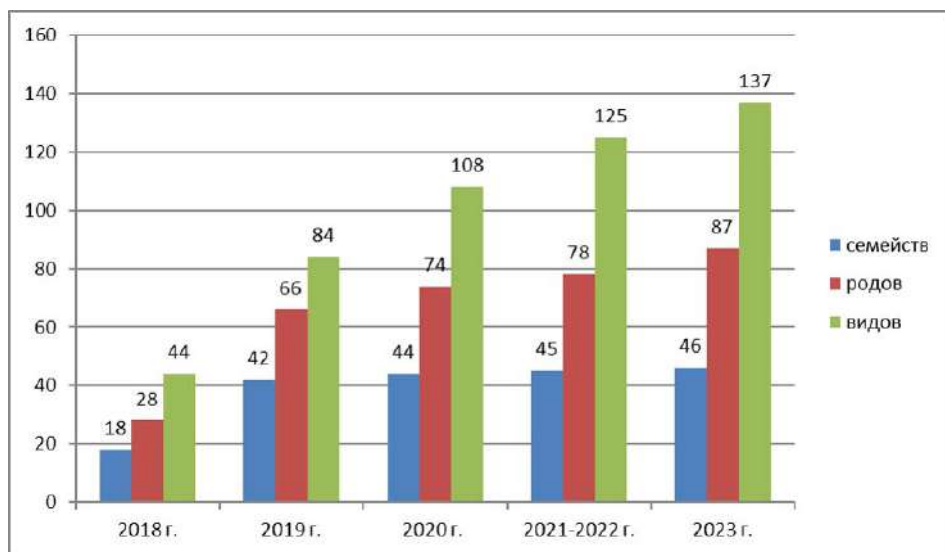


Рисунок 3. Динамика таксономического состава флоры травостоя  
(составлен авторами)

Figure 3. Dynamics of taxonomic composition of grass flora  
(compiled by the authors)

В 2019 г. разнообразие представленных семейств в сообществе увеличилось, поэтому средний показатель числа приходящихся на семейство видов возрос незначительно и составил 2.66, но резко выросло число семейств с насыщенностью выше среднего показателя: *Asteraceae* (15), *Ranunculaceae*

(9), *Lamiaceae* (5), *Apiaceae* (4) и *Onagraceae* (4). По три таксона насчитывают *Caryophyllaceae*, *Fabaceae*, *Poaceae*, *Polygonaceae* и *Rosaceae*. Наблюдаемое увеличение систематического разнообразия в семействах происходит за счет роста родовой компоненты.



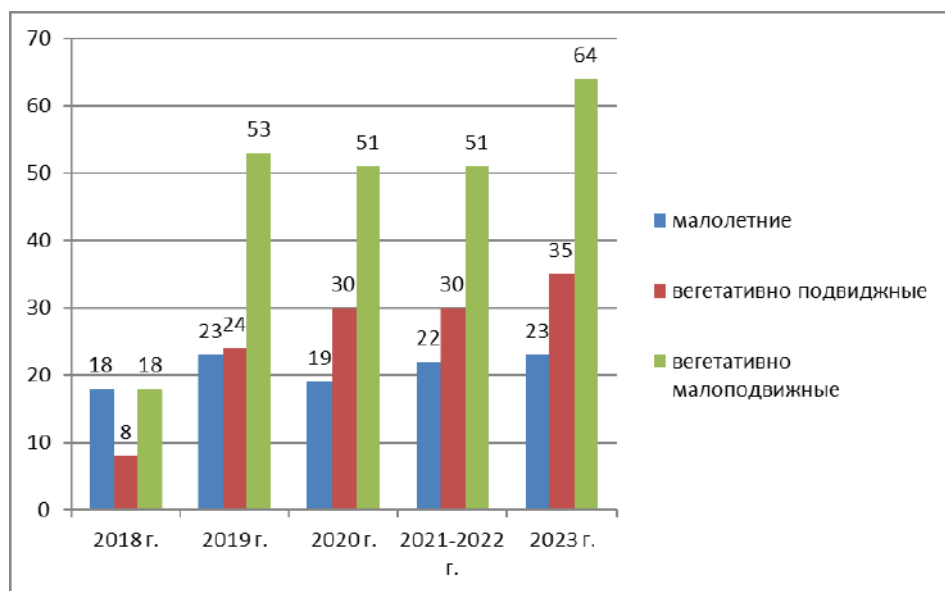
**Рисунок 4.** Травостой на участке переноса перед экспериментом с доминированием однолетника недотроги обыкновенной (*Impatiens noli-tangere* L.) (составлен авторами)

**Figure 4.** Grass canopy at the transfer site before the experiment with the dominance of *Impatiens noli-tangere* L. (compiled by the authors)

В 2020–2023 гг. продолжился рост видового разнообразия растений, на конец наблюдений средний показатель числа видов составил 2.97. Число семейств – 46 достигло показателя участка донора переноса почвы. Спектр ведущих пяти семейств в 2023 г. также оказался сходным: *Asteraceae* (21), *Rosaceae* (13), *Ranunculaceae* (9), *Poaceae* (7), *Fabaceae* (7). По составу он близок к «*Rosaceae*-типу» (Хохряков, 2000), характерному для бассейна р. Томи (Шереметова, Шереметов, 2016). Следовательно, формирование флоры на территории исследования находится на стадии активного становления, но уже с проявлением региональных специфических черт.

В 2019 г., после нанесения почвенно-грунтового слоя с диаспорами; число малолетних (одно-двулетних) растений практически не изменилось – 17 видов, но их доля в сложении спектра жизненных форм сократилась с 41 до 23%, напротив, участие многолетних видов возросло с 59 до 77% (рис. 5). Среди последних появились представители новых групп – луковичных – гусиный лук зернистый (*Gagea granulosa* Turcz.) и корнеклубневых – борец выющийся (*Aconitum volubile* Pall. ex Koelle). Доля участия малолетних растений (однолетников и двулетников) в травостое за период наблюдений несколько увеличилась с первичных 18 видов до флуктуации в интервале 19–

23. Однако доля этой группы в общем составе флоры упала с 41% в 2018 г. до 16.8% в 2023 г. Снижение доли малолетних растений является одним из показателей успешности протекания восстановительной сукцессии и повышения стабильности формирующегося сообщества (Bakr et al., 2024).



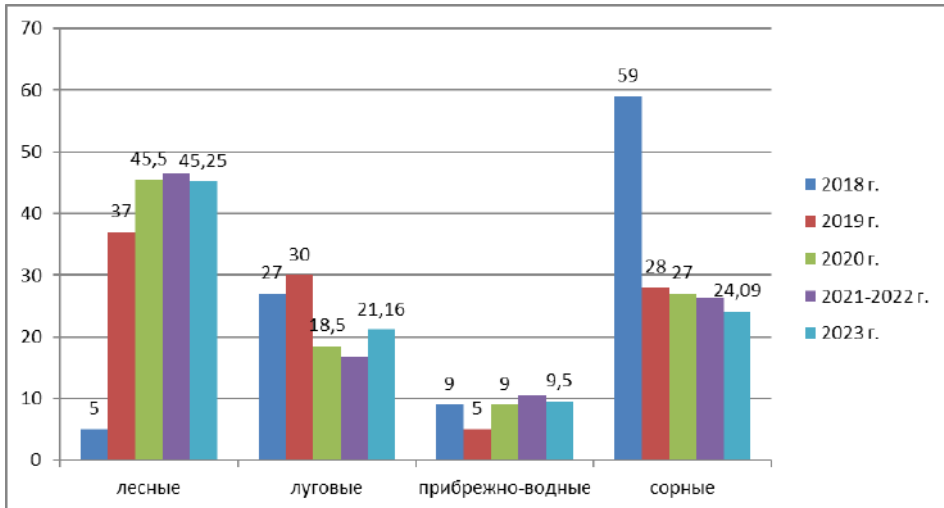
**Рисунок 5.** Динамика состава жизненных форм флоры травостоя  
 (составлен авторами)

**Figure 5.** Dynamics of flora life forms composition of the grass canopy  
 (compiled by the authors)

Еще более явные изменения наблюдаются в эколого-ценотическом составе флоры (рис. 6). В 2018 г. ведущую роль в сложении травостоя играли сорные растения (59%, 26 видов), которые, по сути, образовали агрегации однолетних – хеноподиаструма гибридного (*Chenopodiastrum hybridum* (L.) S. Fuentes, Uotila & Borsch), пикульника двунадрезанного (*Galeopsis bifida* Boenn), конопли посевной (*Cannabis sativa* L.), лебеды стреловидной (*Atriplex sagittata* Borkh.), осота огородного (*Sonchus oleraceus* L.), недотроги обыкновенной (*Impatiens noli-tangere* L.) и многолетних – мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara* L.), лопуха паутинистого (*Arctium tomentosum* Mill.), одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* L.), мелкопестничка канадского (*Conyza canadensis* (L.) Cronquist) и крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.). В 2019-2023 гг. наблюдалось сильное снижение доли участия синантропных видов растений с 59 до 24.09%.

В 2020-2023 гг. на участке переноса ведущую роль в сложении верхнего яруса травостоя в межкулисных коридорах начали играть растения, типичные для черневой тайги (рис. 7): купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), дудник лесной (*Angelica sylvestris* L.), бодяк разнолистный (*Cirsium heterophyllum* (L.) Hill), соссурея мелкоцветковая (*Saussurea parviflora* (Poir.)

DC.), скерда сибирская (*Crepis sibirica* L.), во втором подъярусе очень обильны яснотка белая (*Lamium album* L.) и сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.). Третий подъярус образован первоцветами: хохлаткой крупно-прицветниковой (*Corydalis bracteata* (Steph. ex Willd.) Pers.), ветреницей голубой (*Anemone caerulea* DC.), лютиком однолистным (*Ranunculus monophyllus* Ovcz.) и фиалкой однолистной (*Viola uniflora* L.).



**Рисунок 6.** Динамика эколого-ценотического состава флоры травостоя  
(составлен авторами)

**Figure 6.** Dynamics of the ecological-cenotic flora composition of the grass stand  
(compiled by the authors)



**Рисунок 7.** Формирование на участке переноса почвы травостоя черневой тайги  
(составлен авторами)

**Figure 7.** Formation of *Abies sibirica* dominated taiga grass canopy on the soil transfer site  
(compiled by the authors)

## Заключение

Рекультивация нарушенных земель и восстановление видового разнообразия играют важную роль в реализации экологической промышленной политики на региональном уровне. Основные подходы к техническому и биологическому этапам рекультивации нарушенных добычей угля территорий приведены в информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям 37-2023 «Добыча и обогащение угля».

В данном ситуационном исследовании представлены результаты эксперимента по коррективке восстановительной сукцессии в искусственном сосновом насаждении, высаженном в ходе биологического этапа рекультивации.

Установлено, что структура растительного покрова и флористический состав травостоя межкулисных коридоров искусственного соснового насаждения с 2018 по 2023 годы претерпели значительные качественные и численные изменения. Наблюдалась сукцессия от случайной агрегации однолетних синантропных растений к формированию сложной ассоциации черневой тайги. Количественно флористический состав увеличился на 93 таксона и на август 2023 г. был представлен 137 видами высших сосудистых растений, относящихся к 87 родам и 46 семействам. По количеству семейств он достиг показателя участка донора переноса почвы и приблизился к нему по составу ведущих семейств. При этом, в нем резко сократилась доля однолетних видов нарушенных местообитаний и увеличилось присутствие растений эколого-ценологических групп, характеризующих лесные ценозы. То есть на участках наблюдения отмечена восстановительная сукцессия лесного типа.

Таким образом, предложенный в работе метод позволит резко повысить эффективность сохранения и восстановления биологического разнообразия в регионах с открытой угледобычей. Он обеспечит использование ценного компонента экосистемы – почвы, не просто как источника питательных элементов для растений, а как неотъемлемой части биологических систем, компонента, содержащего диаспоры живой материи, необходимой базы для «включения» региональных восстановительных сукцессий.

## Список литературы

Гусева, Т.В., Тихонова, И.О. (2025) Стратегическая социально-экологическая оценка и природоприближённые решения, *Материалы XVIII Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики (РОЭЭ)*, Апатиты, Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, с. 320-324.

Куприянов, А.Н., Манаков, Ю.А., Баранник, Л.П. (2010) *Восстановление экосистем на отвалах горнодобывающей промышленности Кузбасса*, Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 160 с.

Лашинский, Н.Н. (2009) *Растительность Салаирского кряжа*, Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 263 с.

---

Миркин, Б.М., Наумова, Л.Г., Соломеш, А.И. (2001) *Современная наука о растительности*, Москва, Логос., 264 с.

Отмахов, Ю.С., Королук, А.Ю., Ермаков, А.А. (2018) Некоторые рекомендации по исследованию растительного покрова при выполнении инженерно-экологических изысканий, *Инженерные изыскания*, т. XII, № 5-6, с. 20-31.

Скобелев, Д.О. (2025) Природный капитал как дарственный фонд, *Материалы XVIII Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики (РОЭЭ)*, Апатиты, Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, с. 28-32

Хохряков, А.П. (2000) Таксономические спектры и их роль в сравнительной флористике, *Бот. журн.*, т. 85, № 5, с. 1-11.

Шереметова, С.А., Шереметов, Р.Т. (2020) *Бассейн реки Томи (флористические и физико-географические особенности)*, Новосибирск, Академическое из-во «Гео», 323 с.

Bakr, J., Kompała-Bąba, A., Bierza, W., Hutniczak, A., Błońska, A., Chmura, D., Magurno, F., Jagodziński, A.M., Besenyey, L., Bacler-Żbikowska, B., Woźniak, G. (2024) Plant Species and Functional Diversity of Novel Forests Growing on Coal Mine Heaps Compared with Managed Coniferous and Deciduous Mixed Forests, *Forests*, vol. 15(4), p. 730, URL: <https://doi.org/10.3390/f15040730>.

Bosch-Serra, A.D., Cruz, J., Poch, R.M. (2023) Soil Quality in Rehabilitated Coal Mining Areas, *Appl. Sci.*, vol. 13(17), p. 9592, URL: <https://doi.org/10.3390/app13179592>.

## References

Guseva, T.V., Tikhonova, I.O. (2025) Strategicheskaya social'no-ekologicheskaya ocenka i prirodopriblizhyonnye resheniya [Strategic Social and Environmental Assessment Nature-based Solutions], *Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Rossijskogo obshchestva ekologicheskoy ekonomiki (ROEE)* [Proceedings of XVIII International Scientific and Practical Conference of Russian Society for Environmental Economics (RSEE)], Kola Science Centre Publishing, Apatity, Russia, pp. 320-324.

Kupriyanov, A.N., Manakov, Yu.A., Barannik, L.P. (2010) *Vosstanovlenie ekosistem na otvalah gornodobyvayushchej promyshlennosti Kuzbassa* [Ecosystem Remediation on Mining Waste Dumps in Kuzbass], Geo Academic Publishing, Novosibirsk, Russia, 160 p.

Lashchinskij, N.N. (2009) *Rastitel'nost' Salairskogo kryazha* [Salair Ridge Vegetation], Geo Academic Publishing, Novosibirsk, Russia, 263 p.

Mirkin, B.M., Naumova, L.G., Solomeshch, A.I. (2001) *Sovremennaya nauka o rastitel'nosti* [Contemporary Vegetation Science], Logos., Moscow, Russia, 264 p.

Otmahov, Yu.S., Korolyuk, A.Yu., Ermakov, A.A. (2018) Nekotorye rekomendacii po issledovaniyu rastitel'nogo pokrova pri vypolnenii inzhenerno-ekologicheskikh izyskanij [Some recommendations for studying vegetation cover when performing engineering and environmental surveys], *Inzhenernye izyskaniya*, vol. XII, no. 5-6, pp. 20-31.

Skobelev, D.O. (2025) Prirodnyj kapital kak darstvennyj fond [Natural Capital as Endowment Fund], *Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Rossijskogo obshchestva ekologicheskoy ekonomiki (ROEE)* [Proceedings of XVIII International Scientific and Practical Conference of Russian Society for Environmental Economics (RSEE)], Kola Science Centre Publishing, Apatity, Russia, pp. 28-32

Hohryakov, A.P. (2000) Taksonomicheskie spektry i ih rol' v sravnitel'noj floristike [Taxonomic Spectra and Their Role in Comparative Floristry], *Bot. zhurn.*, vol. 85, no. 5, pp. 1-11.

Sheremetova, S.A., Sheremetov, R.T. (2020) *Bassejn reki Tomi (floristicheskie i fiziko-geograficheskie osobennosti)* [Tom River Basin (Floristic and Physical-Geographical Features)], Geo Academic Publishing, Novosibirsk, Russia, 323 p.

Bakr, J., Kompała-Bąba, A., Bierza, W., Hutniczak, A., Błońska, A., Chmura, D., Magurno, F., Jagodziński, A.M., Besenyei, L., Bacler-Żbikowska, B., Woźniak, G. (2024) Plant Species and Functional Diversity of Novel Forests Growing on Coal Mine Heaps Compared with Managed Coniferous and Deciduous Mixed Forests, *Forests*, vol. 15(4), p. 730, URL: <https://doi.org/10.3390/f15040730>.

Bosch-Serra, A.D., Cruz, J., Poch, R.M. (2023) Soil Quality in Rehabilitated Coal Mining Areas, *Appl. Sci.*, vol. 13(17), p. 9592, URL: <https://doi.org/10.3390/app13179592>.

*Статья поступила в редакцию (Received): 01.09.2025.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 23.03.2026.*

### **Для цитирования / For citation:**

Климов, А.В., Перфильев, Е.Е., Стадникова, К.В., Тихонова, И.О. (2026) Восстановление нарушенных земель: использование автохтонных почв для создания зонального разнообразия в искусственных насаждениях, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 119-132, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-119-132.

Klimov, A.V., Perfilov, E.E., Stadnikova, K.V., Tikhonova, I.O. (2026) Disturbed Land Remediation: Using Indigenous Soils to Create Zonal Diversity in Artificial Canopies, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 3-4, pp. 119-132, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-119-132.

## Использование многомерного анализа для выделения гидрохимических маркеров антропогенного воздействия

*Л.В. Новикова\*, Н.Ю. Степанова*

Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
РФ, 420008, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

\* Адрес для переписки: [Ludmila.Novikova@kpfu.ru](mailto:Ludmila.Novikova@kpfu.ru)

**Реферат.** Нефтегазодобывающая деятельность остается приоритетным источником загрязнения водных экосистем. Однако отсутствие специфических маркеров затрудняет идентификацию виновного в причинении накопленного экологического ущерба. Целью работы было выявление комплекса индикаторных показателей характерных для нефтедобывающей деятельности, с использованием многомерного статистического анализа. Исследование проведено на основе 232 проб поверхностных вод, отобранных на реке Шешме, в водосборном бассейне которой ведется нефтедобыча, в сравнении с рекой Мёшей, в бассейне которой осуществляется преимущество аграрное производство. Анализировались 30 параметров, включая стандартные показатели качества воды, элементный анализ, органические загрязняющие вещества (по ХПК, БПК<sub>5</sub>). Применены методы описательной статистики (тест Шапиро-Уилка для проверки нормальности), непараметрического сравнения групп (Манна-Уитни, U-критерий), анализ главных компонент (PCA), иерархическая кластеризация (метод Ward.D2) и метод K-средних (K-means) с валидацией, пермутационный многомерный анализ дисперсии (PERMANOVA).

По результатам анализа гидрохимических данных реки достоверно различаются по 65.6% показателей. Выявлена триада специфических маркеров нефтедобывающей деятельности: хлориды (в исследуемой реке медиана в 6.2 раза выше), молибден и стронций (оба маркера пластовых вод), а также кадмий и свинец. Анализ главных компонент показал четкое разделение облаков точек гидрохимических данных двух рек (перекрытие менее 10%). Основной вклад в PC1 вносит барий (9.63%), в PC2 – БПК<sub>5</sub> (10.73%). Кластеризация выделила три уровня загрязнения: условно-чистая вода ( $n \approx 71$ ), среднее загрязнение ( $n \approx 140$ ) и высокое загрязнение ( $n \approx 16$  все пробы из р. Шешмы). PERMANOVA подтвердила статистическую значимость различий ( $F_{1,220} = 19.039$ ,  $p = 0.001$ ).

На основе многомерного анализа идентифицированы пять специфических индикаторов нефтедобывающей деятельности, рекомендованные к внедрению в системы производственного и экологического мониторинга. Работа имеет важное практическое применение для идентификации источников загрязнения и установления ответственности за накопленный экологический ущерб в нефтедобывающих регионах, а также теоретическое значение для развития многомерных методов экологической диагностики.

**Ключевые слова.** Нефтяное загрязнение, поверхностные воды, гидрохимический мониторинг, PCA.

## Using multidimensional analysis to identify water pollution markers

*L.V. Novikova\*, N.Yu. Stepanova*

Kazan Federal University,  
18, Kremlyovskaya str., 420008, Kazan, Russian Federation

\*Correspondence address: *Ludmila.Novikova@kpfu.ru*

**Abstract.** Oil and gas production remain a primary source of pollution for aquatic ecosystems. However, the lack of specific markers complicates the identification of parties responsible for cumulative environmental damage. The aim of this study was to identify a set of indicators specific to oil production activities through multivariate statistical analysis. The study was conducted using 232 surface water samples collected from the Sheshma River, with a catchment area dominated by oil extraction, compared to the Myosha River, where the catchment is predominantly agricultural. Thirty parameters were analyzed, including standard water quality indicators, elemental analysis, and organic pollutants (COD, BOD<sub>5</sub>). The following methods were used: descriptive statistics (Shapiro-Wilk test for normality), nonparametric comparison of groups (the Mann-Whitney U test), principal component analysis (PCA), hierarchical clustering (Ward's D2 method), the K-means method with validation, and permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA).

According to the data analysis, the rivers differ reliably in 65.6% of the parameters. A triad of specific markers of oil production activity was identified: chlorides (6.2-fold excess), molybdenum and strontium (both markers of formation waters), as well as cadmium and lead. Principal component analysis showed a clear separation of the point clouds of hydrochemical data of the two rivers (overlapping less than 10%). The main contribution to PC1 is made by barium (9.63%), and to PC2 – by BOD<sub>5</sub> (10.73%). Clustering identified three levels of pollution: conventionally clean water ( $n \approx 71$ ), moderate pollution ( $n \approx 140$ ), and high pollution ( $n \approx 16$ , all samples from the Sheshma River). PERMANOVA confirmed the statistical significance of the differences ( $F_{1,220}=19.039$ ,  $p=0.001$ ).

Based on a multivariate analysis, five specific indicators of oil production activities were identified and are recommended for implementation in industrial and environmental monitoring systems. This work has important practical applications for identifying pollution sources and establishing liability for environmental damage in oil-producing regions, as well as theoretical significance for the development of multivariate methods in environmental diagnostics.

**Keywords.** Oil pollution, surface water, hydrochemical monitoring, PCA.

---

## Введение

Нефтегазодобывающая деятельность по-прежнему остается приоритетным загрязнителем водных объектов. Причиной являются не только аварийные случаи разлива нефтепродуктов (Гарелина, 2025; Кленкин, Агапов, 2011), но и результаты штатной работы производственных объектов<sup>1)</sup> (Рахматуллин и др., 2023; Титов, Ходов, 2015). В воду могут попадать сырая нефть, нефтепродукты, шлам, буровой раствор, пластовые воды, содержащие различные химические соединения естественного происхождения (хлориды, сульфаты, тяжелые металлы, органические загрязняющие вещества, включая ПАУ, ВТЕХ), а также используемые для поддержания нефтеотдачи пластов (загустители, коагулянты, флокулянты, ингибиторы коррозии, регуляторы, стабилизаторы, эмульгаторы) (Лешкович и др., 2020; Bakke et al., 2013; Yusta-García et al., 2017).

Развитая нефтегазовая промышленность обуславливает высокие техногенные нагрузки на водные объекты и соответственно требуется наблюдение за их состоянием. Традиционные показатели, такие как нефтепродукты, уже не являются специфическими и не могут в полной мере охарактеризовать влияние нефтяной промышленности на состояние поверхностных и подземных вод в силу масштабного загрязнения окружающей среды (ОС) и их поступления в водные объекты с поверхностным стоком.

Целью нашей работы было выявление индикаторов нефтегазодобывающей деятельности с применением многомерного статистического анализа для последующего использования их в рамках производственного экологического мониторинга и при идентификации виновного в причинении накопленного экологического вреда.

## Методы и материалы

Для выделения показателей, характерных для нефтедобывающей деятельности, были выбраны реки, сходные по географическим и гидрологическим условиям, но отличающиеся отсутствием или наличием нефтегазодобывающей деятельности в бассейне реки. Для соблюдения данного условия использовались такие критерии как географическая близость объектов; равенство площади и зонирования водосборного бассейна; схожесть преобладающих типов хозяйственной деятельности, объема стока; а также отсутствие крупных населенных пунктов, промышленных предприятий и искусственного зарегулирования стока.

По результатам предварительного анализа была выбрана р. Шешма, на водосборе которой ведется нефтедобыча, в качестве референтного водного объекта – р. Мёша. Обе реки являются притоками 1 порядка р. Камы.

---

<sup>1)</sup> Влияние добычи и разработки нефти и газа на экологию водно-болотных угодий района "Нигер-дельта" URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39948240>.

Площадь водосбора р. Мёши составляет 4.18 тыс. км<sup>2</sup>, длина реки 186.4 км, густота речной сети 0.35 км·км<sup>-2</sup>. По гидрохимическому режиму вода относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу с малой минерализацией в межень. Площадь водосбора р. Шешмы составляет 6.2 тыс. км<sup>2</sup>, длина – 234.1 км, густота речной сети – 0.34 км·км<sup>-2</sup>. Вода в реке гидрокарбонатно-хлоридно-кальциевая, средней минерализации (до 700 мг·л<sup>-1</sup>) (Водные объекты..., 2018; Ермолаев и др., 2007). Питание у обеих рек смешанное, а бассейны имеют сходное распределение площадей под разными классами поверхностей земли (табл. 1).

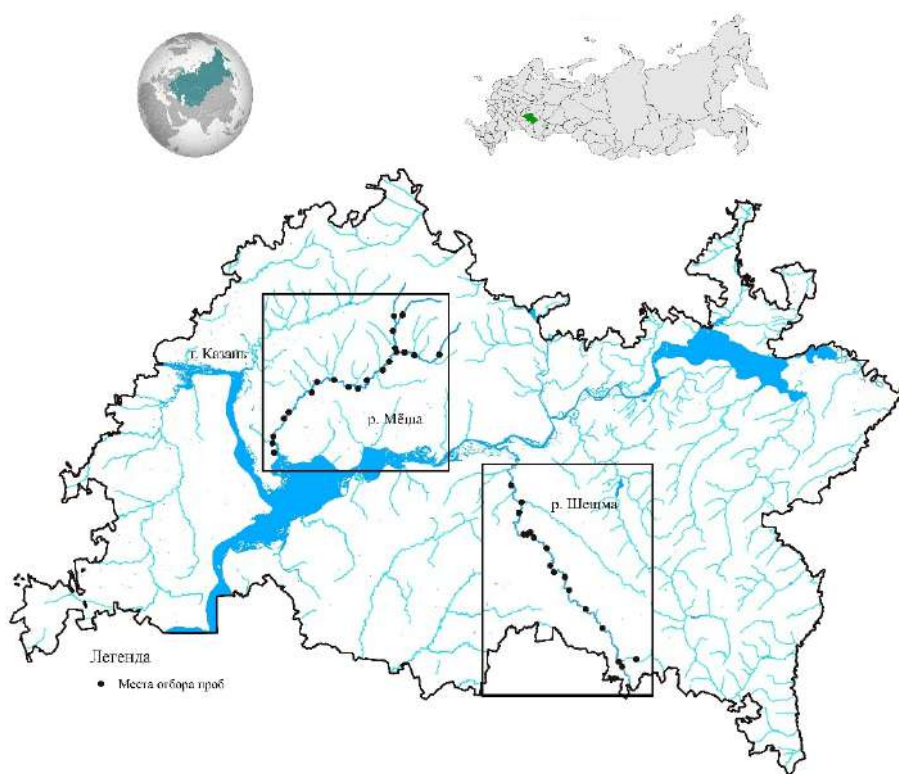
**Таблица 1.** Классы поверхностей земли: ESA WorldCover 10m v200, %

**Table 1.** Land cover classes: ESA WorldCover 10m v200, %

| <b>Классы поверхностей земли: ESA WorldCover 10m v200</b>             | <b>Мёша</b> | <b>Шешма</b> |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
| Земли под древесно-кустарниковой растительностью                      | 0.0%        | 0.0%         |
| Земли, занятые травянистой растительностью                            | 21.7%       | 28.6%        |
| Пахотные земли:                                                       | 49.0%       | 45.3%        |
| Земли населенных пунктов:                                             | 1.6%        | 0.6%         |
| Голая или разреженная растительность (пустыни, скалистые территории): | 0.1%        | 0.1%         |
| Земли водного фонда                                                   | 2.6%        | 0.4%         |
| Травянистые водно-болотные угодья:                                    | 0.3%        | 0.2%         |
| Древесный покров (леса и лесостепи):                                  | 24.7%       | 24.8%        |

В бассейне р. Шешмы ведутся как сельскохозяйственная, так и нефтедобывающая деятельности, на водосборе р. Мёши только сельскохозяйственная. В бассейнах обеих рек отсутствуют крупные промышленные предприятия; загрязнение поверхностных вод происходит в результате эрозионных процессов, несоблюдения агротехнических мероприятий при обработке почв, диффузного стока с территории водосбора. На водосборе р. Шешмы возможно антропогенное воздействие при разработке и эксплуатации кустов скважин, аварийных порывах нефтепроводов.

Пробы поверхностных вод отбирались по течению обеих рек в соответствии с требованиями нормативной документации (РД 52.24.353-12, 2012) с глубины 0.5 м от поверхности (рис. 1). На р. Мёше на 21 станции было отобрано 122 пробы, на р. Шешме на 18 станциях – 110 проб.



**Рисунок 1.** Схема отбора проб поверхностных вод

**Figure 1.** Surface water sampling map

Для пробоподготовки и анализа использовались утвержденные методики. В пробах воды определяли pH и электропроводность (РД 52.24.495-2017)<sup>2)</sup>, растворенный кислород (РД 52.24.419-2019)<sup>3)</sup>, БПК<sub>5</sub> (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97)<sup>4)</sup>. Хлориды определяли аргентометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.96-97)<sup>5)</sup>, сульфаты – турбидиметрическим (ПНД Ф 14.1:2.159-2000)<sup>6)</sup>, гидрокарбонаты – титриметрическим (ПНД Ф 14.2.99-97, 2017)<sup>7)</sup>,

---

<sup>2)</sup> РД 52.24.495-2017 Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод методика выполнения измерений электрометрическим методом.

<sup>3)</sup> РД 52.24.419-2019 Массовая концентрация растворенного кислорода в водах: методика выполнения измерений йодометрическим методом.

<sup>4)</sup> ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97 Методика выполнения измерений биохимического потребления кислорода после n-дней инкубации (БПК<sub>полн.</sub>) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах.

<sup>5)</sup> ПНД Ф 14.1:2.96-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в пробах природных и очищенных сточных вод аргентометрическим методом.

<sup>6)</sup> ПНД Ф 14.1:2.159-2000 Методика выполнения измерений массовой концентрации сульфат-ионов в пробах природных и сточных вод турбидиметрическим методом.

<sup>7)</sup> ПНД Ф 14.2.99-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации гидрокарбонатов в пробах природных вод титриметрическим методом.

---

ХПК – фотометрическим (ПНД Ф 14.1:2:4.210-2005)<sup>8)</sup>, азотную группу – фотометрическим:  $\text{NH}_4^+$  с реактивом Несслера (ПНД Ф 14.1:2:4.262-2010)<sup>9)</sup>,  $\text{NO}_2^-$  – с реактивом Грисса (ПНД Ф 14.1:2:4.3-95)<sup>10)</sup>,  $\text{NO}_3^-$  – с салициловой кислотой (ПНД Ф 14.1:2:4.4-95)<sup>11)</sup>, фосфаты – фотометрическим с молибдатом аммония (ПНД Ф 14.1:2:3:4.112-2023)<sup>12)</sup>, нефтепродукты (НП) – ИК-спектрофотометрии (ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000)<sup>13)</sup>, СПАВ (ГОСТ 31857-2012, 2014)<sup>14)</sup>, гравиметрическим – взвешенные вещества (ВВ) (ПНД Ф 14.1:2.110-97)<sup>15)</sup> и сухой остаток (ПНД Ф 14.1:2.114-97)<sup>16)</sup>, атомно-эмиссионной спектрометрии – Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Mo, Ba, Sr, Se, V, P (ПНД Ф 14.1:2:4.135-98)<sup>17)</sup>.

Статистическая обработка результатов осуществлялась в программе Statistica 8.0 и в RStudio с использованием языка R. Проверка на нормальность проводилась с использованием тестов нормальности Шапиро-Уилка, сравнение групп с использованием t-теста Манна-Уитни для данных с распределением отличным от нормального. Также были проведены анализ главных компонент (PCA), кластеризация данных (HCA и k-means) с последующей валидацией результатов с использованием Silhouette Score, Davies-Bouldin index, Calinski-Harabasz index. Статистическую значимость различий между реками оценивали с использованием пермутационного многомерного анализа дисперсии (PERMANOVA). Картографический материал оформлен в QGIS 3.4.15.

Для разработки количественной системы оценки риска загрязнения вод применили логистическую регрессию и дерево решений (Decision Tree). Отбор переменных проводился методом последовательного включения с кросс-валидацией ( $k=5$ ). Кадмий исключен из-за переобучения на обучающей

---

<sup>8)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.210-2005 Методика измерений химического потребления кислорода (ХПК) в пробах питьевых, природных и сточных вод фотометрическим методом.

<sup>9)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.262-2010 Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в питьевых, поверхностных (в том числе морских) и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера.

<sup>10)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.3-95 Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса.

<sup>11)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.4-95 Методика измерений массовой концентрации нитрат-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой.

<sup>12)</sup> ПНД Ф 14.1:2:3:4.112-2023 Методика измерений массовой концентрации фосфат-ионов (в том числе с пересчетом на массовую концентрацию фосфора фосфатов) в пробах питьевых, природных (поверхностных и подземных) и сточных вод фотометрическим методом с молибдатом аммония.

<sup>13)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных водах методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратометров серии КН.

<sup>14)</sup> ГОСТ 31857-2012 Методы определения содержания поверхностно-активных веществ.

<sup>15)</sup> ПНД Ф 14.1:2.110-97 Методика выполнения измерений содержаний взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом.

<sup>16)</sup> ПНД Ф 14.1:2.114-97 Методика выполнения измерений массовой концентрации сухого остатка в пробах природных сточных вод.

---

выборке ( $AUC_{обуч}=0.98$  против  $AUC_{провер}=0.72$ ), свинец – из-за недообучения (низкие  $\beta$  и  $p>0.5$ ). В качестве независимых переменных выбраны три гидрохимических показателя: концентрация хлоридов (Cl), молибдена (Mo) и стронция (Sr), которые были выделены в качестве маркеров по результатам исследования. Зависимая переменная кодировалась бинарным образом: 1 = воды подвергнутые воздействию нефтедобычи (р. Шешма), 0 = «фоновые воды» (р. Мёша).

Модели обучены на 83 пробах воды (42 – из р. Мёша, 41 – из р. Шешма). Для нормализации распределения и стабилизации дисперсии концентрации Cl, Mo и Sr в логистической регрессии подвергли логарифмическому преобразованию ( $\log_{10}$ ) с последующей стандартизацией методом z-score. Логистическая регрессия реализована с использованием функции связи logit в обобщенной линейной модели (GLM). Параметры модели оценены методом максимального правдоподобия.

Дерево решений построено алгоритмом CART (Classification and Regression Trees) с параметром сложности  $cp = 0.01$  и минимальным числом наблюдений в узле  $minsplit = 5$ . Качество моделей оценено стандартными метриками классификации: точность (Accuracy), чувствительность/Полнота (Sensitivity), специфичность (Specificity), точность прогнозов (Precision), F1-Score, площадь под ROC-кривой (AUC)

Статистическую значимость коэффициентов моделей оценили с использованием z-тестов при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ . Расчеты выполнены в программной среде R (версия 4.5) с использованием пакетов tidyverse, gpart, pROC и ggplot2.

## Результаты

### *Описательная статистика*

Анализ данных (табл. 2) показал, что реки достоверно различаются по 65.6% показателей, качество воды в р. Шешме отличается от контрольной реки в худшую сторону.

Наибольшая кратность превышения ПДК отмечается по содержанию в воде р. Шешмы растворенных форм Cu и Mn – от 3 до 8 ПДК. При этом среднее содержание Mn в р. Мёше превышает содержание в Шешме в 1.8 раза (рис. 2). Кратность превышения ПДК по содержанию Cu в р. Шешме в среднем в 1.5 раза выше, чем в р. Мёше. Содержание Se превышает ПДК в среднем в 5 раз в обеих реках.

---

<sup>17)</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.135-98 МВИ массовых концентраций металлов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой в питьевой, природной, сточной водах и атмосферных осадках.

---

**Таблица 2.** Химический состав природных вод

**Table 2.** Chemical composition of natural waters

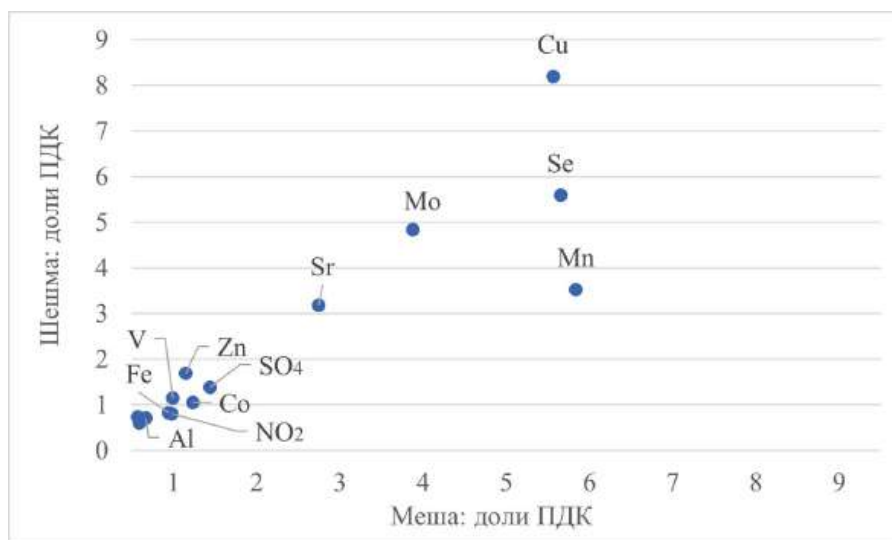
| Показатель                    | Мёша                              | Шешма                             | Показатель       | Мёша                                | Шешма                               |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| pH*                           | $\frac{8.11 \pm 0.04}{8.05}$      | $\frac{8.25 \pm 0.04^1}{8.34}$    | Al <sup>2</sup>  | $\frac{26.72 \pm 1.89}{23.40}$      | $\frac{52.92 \pm 11.44}{29.10}$     |
| Гидро-карбонаты <sup>3*</sup> | $\frac{277.85 \pm 10.61}{300.84}$ | $\frac{364.00 \pm 12.35}{370.00}$ | As <sup>2</sup>  | $\frac{11.40 \pm 1.79}{6.82}$       | $\frac{9.63 \pm 1.33}{4.34}$        |
| Нитрит-ион <sup>3*</sup>      | $\frac{0.08 \pm 0.008}{0.06}$     | $\frac{0.06 \pm 0.009}{0.04}$     | Ba <sup>2*</sup> | $\frac{54.58 \pm 0.75}{54.94}$      | $\frac{68.16 \pm 0.47}{67.79}$      |
| Нитрат-ион <sup>3*</sup>      | $\frac{5.64 \pm 0.32}{5.58}$      | $\frac{8.77 \pm 0.69}{9.10}$      | Cd <sup>2*</sup> | $\frac{0.017 \pm 0.008}{0}$         | $\frac{1.29 \pm 0.30}{0}$           |
| Ион аммония <sup>3*</sup>     | $\frac{0.14 \pm 0.02}{0.09}$      | $\frac{0.15 \pm 0.03}{0.03}$      | Co <sup>2</sup>  | $\frac{12.36 \pm 1.45}{17.05}$      | $\frac{8.33 \pm 1.20}{0.05}$        |
| Сульфаты <sup>3</sup>         | $\frac{144.15 \pm 6.84}{131.15}$  | $\frac{134.76 \pm 9.01}{129.33}$  | Cr*              | $\frac{0.70 \pm 0.22}{0}$           | $\frac{0.80 \pm 0.15}{0.45}$        |
| Фосфаты <sup>3</sup>          | $\frac{0.05 \pm 0.007}{0.03}$     | $\frac{0.093 \pm 0.01}{0.10}$     | Cu <sup>2*</sup> | $\frac{5.56 \pm 0.91}{1.50}$        | $\frac{6.83 \pm 0.90}{3.20}$        |
| Хлориды <sup>3*</sup>         | $\frac{11.26 \pm 0.36}{11.03}$    | $\frac{63.45 \pm 2.51}{68.77}$    | Fe <sup>2</sup>  | $\frac{94.06 \pm 16.57}{41.80}$     | $\frac{77.87 \pm 5.19}{75.75}$      |
| Сухой остаток <sup>3*</sup>   | $\frac{538.14 \pm 21.73}{534.00}$ | $\frac{605.27 \pm 16.79}{622.00}$ | Ni <sup>2</sup>  | $\frac{5.92 \pm 1.04}{0}$           | $\frac{4.89 \pm 0.78}{0.30}$        |
| ВВ <sup>3*</sup>              | $\frac{20.90 \pm 1.97}{12.05}$    | $\frac{120.82 \pm 18.24}{164.00}$ | Mn <sup>2*</sup> | $\frac{58.34 \pm 3.66}{54.04}$      | $\frac{33.08 \pm 2.29}{26.88}$      |
| Минерализация <sup>3*</sup>   | $\frac{616.41 \pm 24.69}{670.30}$ | $\frac{758.32 \pm 23.40}{772.00}$ | Mo <sup>2*</sup> | $\frac{3.87 \pm 0.15}{3.76}$        | $\frac{4.84 \pm 0.09}{4.91}$        |
| БПК <sup>3</sup>              | $\frac{1.37 \pm 0.07}{1.22}$      | $\frac{1.38 \pm 0.18}{1.39}$      | Pb <sup>2*</sup> | $\frac{0.34 \pm 0.11}{0}$           | $\frac{6.11 \pm 1.19}{0}$           |
| СПАВ <sup>3*</sup>            | $\frac{0.003 \pm 0.0005}{0}$      | $\frac{0.01 \pm 0.002}{0.01}$     | Se <sup>2</sup>  | $\frac{11.30 \pm 0.27}{11.30}$      | $\frac{11.18 \pm 0.25}{11.36}$      |
| НП <sup>3</sup>               | $\frac{0.03 \pm 0.003}{0.02}$     | $\frac{0.04 \pm 0.005}{0.02}$     | Sr <sup>2*</sup> | $\frac{1098.63 \pm 69.79}{1032.16}$ | $\frac{1272.96 \pm 27.46}{1267.01}$ |
| ХПК <sup>3*</sup>             | $\frac{13.24 \pm 0.67}{11.80}$    | $\frac{19.24 \pm 1.91}{19.20}$    | V <sup>2*</sup>  | $\frac{0.995 \pm 0.05}{0.98}$       | $\frac{1.15 \pm 0.04}{1.15}$        |
| p <sup>2</sup>                | $\frac{15.09 \pm 4.24}{2.55}$     | $\frac{11.31 \pm 4.23}{0}$        | Zn <sup>2*</sup> | $\frac{11.47 \pm 1.54}{1.42}$       | $\frac{14.10 \pm 1.47}{10.30}$      |

**Примечания:** <sup>1</sup> Среднее ± ошибка / медиана;

<sup>2</sup> мкг л<sup>-1</sup>;

<sup>3</sup> мг л<sup>-1</sup>;

\* выделены достоверно различающиеся показатели.



**Рисунок 2.** Кратность превышения ПДК

**Figure 2.** The rate of excess of the MPC

Выделяются показатели, содержание которых в воде не превышает ПДК, но сильно различается в реках. Так среднее содержание Cd в 75 раз выше в р. Шешме –  $1.29 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$  против  $0.017 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$  в р. Мёше. Сильная правосторонняя асимметрия в распределении Cd (1.89 в Шешме) подтверждает наличие регулярного антропогенного загрязнения вод, а не диффузного фонового содержания как в р. Мёше, где асимметрия составляет 4.2. Также высокая асимметрия Cd в р. Шешме говорит о том, что среднее значение не репрезентативно и необходимо использовать медиану, являющуюся более адекватным показателем «центра» распределения. Аналогичная ситуация наблюдается и в отношении Pb. Среднее содержание хлоридов в 6 раз выше в воде р. Шешме, что может быть обусловлено попаданием высокоминерализованных промышленных вод, применяемых на нефтепромыслах для поддержания пластового давления. Асимметрия данных по Sr близка к 0, что говорит о регулярном поступлении элемента в воду. Несмотря на то, что среднее содержание Zn в воде между реками отличается всего в 1.2 раза, медианы различаются в 7 раз (достоверность различия по тесту Манна-Уитни  $p=0.004$ ). Содержание ВВ в р. Шешме в 6 раз выше по сравнению с р. Мёшей. В р. Шешме выше содержание нитратов, но ниже содержание нитритов и ионов аммония по сравнению с р. Мёшей, что свидетельствует об активно протекающих процессах нитрификации. Содержание НП не превышает установленные нормативы в воде обеих рек.

### PERMANOVA

Пермутационный многомерный анализ дисперсии (PERMANOVA) выявил высокосignимые различия в гидрохимическом составе между исследуемыми реками ( $F_{1,220} = 19.039$ ;  $p = 0.001$ ). Фактор 1 "тип хозяйственной

деятельности в водосборе", объясняет 5.5% общей вариации (табл. 3), в то время как сезонность (фактор 2) влияет на 11.0% вариации. Данные факторы объясняют небольшую часть вариации, что обусловлено исключительной сложностью изучения природных вод, подверженных как влиянию множества локальных источников загрязнения, так и неучтенных глобальных факторов (поверхностный сток, изменение климата, аэрогенный перенос загрязняющих веществ (ЗВ) и т.д.). Ординационные графики (NMDS, PCoA), позволяющие по совпадению паттернов утверждать о реальности и устойчивости структуры данных, показывают ясное разделение облаков точек с минимальным перекрытием (рис. 3).

**Таблица 3.** Результаты анализа PERMANOVA

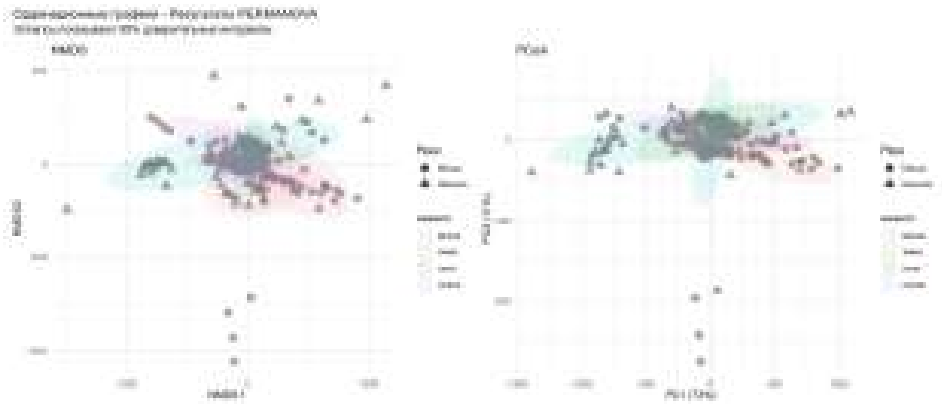
**Table 3.** Results of the PERMANOVA analysis

| Источник вариации   | R <sup>2</sup> | Статистическая значимость | Интерпретация                                                           |
|---------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Сезон               | 11.0%          | ** $p < 0.001$            | Основной фактор – летние/зимние колебания                               |
| Река (Мёша / Шешма) | 5.5%           | *** $p < 0.001$           | Вторичный фактор – различие типа хозяйственной деятельности в водосборе |
| Остаточная вариация | 81.3%          | -                         | Неучтенные факторы                                                      |

Две реки достоверно различаются по химическому составу на уровне значимости  $p < 0.001$ . Критерий F-статистика равный 15.34 указывает на сильное влияние на качество воды типа хозяйственной деятельности в бассейне реки. Значение  $R^2 = 0.05$  (5.5%) указывает на то, что различие между Шешмой и Мёшей объясняют менее 6% общей вариабельности данных, но это не противоречит выводу о существенных различиях – в многомерных экологических данных высокая статистическая значимость может сопровождаться низким эффект-размером из-за большой внутригрупповой дисперсии.

Данные по р. Мёше на NMDS-графиках (рис. 3) представлены преимущественно компактным, плотным облаком точек, сгруппированным в центральной части ординационного пространства, что позволяет говорить о низкой внутригрупповой вариабельности, т.е. относительно постоянстве состава; низкой вероятности экстремальных значений показателей; ввиду низкой вариабельности и повторяемости параметров в разных пробах – о прогнозируемости качества воды. Все вышеперечисленное подтверждает обоснованность выбора р. Мёши в качестве реки сравнения в нашем исследовании.

Данные по р. Шешме представлены широким, рассеянным облаком точек с множественными выбросами, что указывает на высокую внутригрупповую вариабельность, нестабильность состава воды вследствие повышенного антропогенного стресса.



**Рисунок 3.** Ординационные графики

*Рисунок включает в себя два метода ординации nMDS (неметрическое многомерное шкалирование) и PCoA (анализ главных координат)*

**Figure 3.** Ordination plots

*The figure includes two ordination methods: nMDS (non-metric multidimensional scaling) and PCoA (principal coordinates analysis)*

Сезонность имеет более выраженный эффект и является основным фактором, структурирующим данные, объясняя 11.02% вариации (величина *F*-статистики – 10.25,  $p = 0.001$ ). В р. Шешме по сравнению с р. Мёшей более отчетливо видна дифференциация по сезонам. Весенние и осенние пробы расположены ближе к центру; летние смещены в положительном направлении PC1/NMDS1 и характеризуются более высокой вариабельностью и высокими значениями показателей. Зимой наблюдаются минимальные значения показателей с низкой вариабельностью для обеих рек.

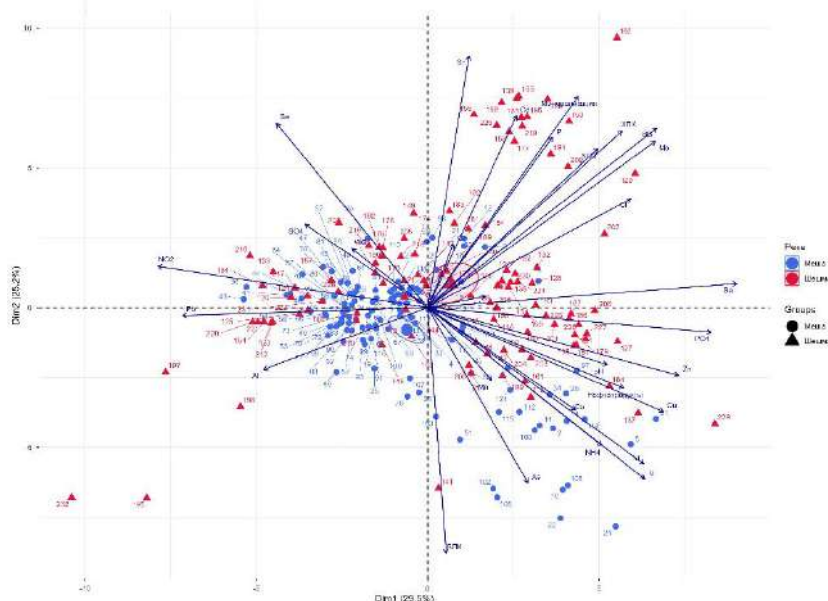
Для корректного сравнения качества воды между реками следует отбирать пробы в один и тот же сезон, поскольку сезонные вариации (11%) сопоставимы или превосходят различия по типу хозяйственной деятельности в бассейне реки (5.5%), а статистическая значимость различия двух рек высокая ( $R^2 = 0.0765$  (7.65%), *F*-значение 19.04 и  $p = 0.001$ ) и исключение сезонного фактора позволит более точно учитывать влияние типа хозяйственной деятельности в водосборе.

### **PCA (Анализ главных компонент)**

На рис. 4, иллюстрирующем результаты PCA, показано, что данные концентрируются в группы с перекрытием менее 10%. Представленные компоненты *Dim 1* и *Dim 2* объясняют 54.7% различий, носят не случайный характер и указывают на наличие нескольких независимых источников загрязнения.

Первая компонента (*Dim 1*) объясняет главное различие между реками – общий уровень загрязнения. Существенный вклад в первую компоненту вносят такие показатели как Ba, (9.63%), NO<sub>2</sub> (7.34%), Zn (6.36%), Pb (6.04%), Cu (5.60%), Mo (5.22%). PC1 выступает как ось "антропогенной нагрузки". Вторая компонента (*Dim 2*) отражает вторичное различие и основной вклад вно-

сят такие показатели как Sr (11.27%), БПК<sub>5</sub> (10.73%), Cd (6.54%), As (5.48%), Se (6.04%), ХПК (5.54%).



**Рисунок 4.** Анализ главных компонент (PCA)

*Пробы, отобранные в р. Шешме, обозначены красными треугольниками, в р. Мёше – синими кругами; стрелками обозначены нагрузки переменных, показывающие как исходные параметры связаны с главными компонентами; обведенные группы – наиболее часто встречающиеся значения показателей*

**Figure 4.** Principal component analysis (PCA)

*Samples collected from the Sheshme River are marked with red triangles, from the Myosha River with blue circles; the arrows indicate the loadings of the variables, showing how the original parameters are related to the principal components; the circled groups represent the most frequently occurring values of the indicators*

Доминирующим показателем с вкладом в PC1 в 9.63% и коэффициентом качества представления ( $\cos^2$ ) равным 0.853, является Ba – классический маркер техногенного воздействия в регионах добычи углеводородов, активно используемый в буровых растворах (Ананьев и др., 1978; Wang et al., 2024), высвобождается в процессе окисления углеводородов микроорганизмами (Jones et al., 2023). Вклад нитритов составляет 7.34% в PC1 с отрицательной координатой, что является показателем сельскохозяйственной деятельности, характерной для водосбора обеих рек. Zn и Pb вносят в PC1 6.36% и 6.04% соответственно с высокими коэффициентами качества представления ( $\cos^2 = 0.563$  и  $0.535$ ).

Sr и Cd вносят высокий вклад в PC2 (11.27% и 6.54% соответственно) с высоким коэффициентом качеством представления ( $\cos^2$  составляет 0.851 и 0.494 соответственно), означая очень хорошую представленность этих показателей.

Профили загрязнения рек принципиально отличаются. Р. Мёша характеризуется более низкими и стабильными значениями анализируемых показателей. Преобладающий массив данных химического состава воды р. Мёши на рис. 2 расположен в 1 четверти с низкими отрицательными значениями Dim1

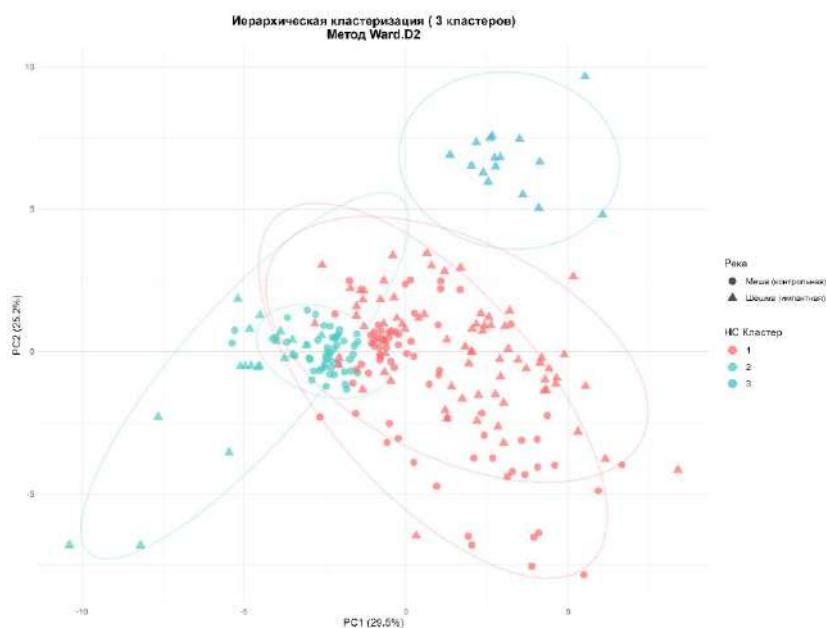
и Dim 2, что свидетельствует о более низком загрязнении проб в том числе Ba, Cu, Zn, Pb по сравнению с р. Шешмой.

В пробах воды обеих рек содержание НП не превышало ПДК ( $0.04 \pm 0.005$  и  $0.03 \pm 0.003$  в Шешме и Мёше соответственно), что снижает эффективность использования их в качестве маркера нефтедобывающей деятельности.

Несмотря на сопоставимые значения БПК<sub>5</sub> между реками (разница не более 1%), в р. Шешме медианальное значение ХПК в 6 раз выше, что может свидетельствовать о наличии органических веществ, устойчивых к биохимическому окислению. Показатель ХПК вносит 5.54% в PC2 и 3.80% в PC1 с хорошим представлением на обеих осях ( $\cos^2 = 0.418$  и  $0.336$ ). Вклад в PC2 БПК<sub>5</sub> составляет 10.73% (коэффициент представления  $\cos^2 = 0.810$ ).

### Кластерный анализ

Для углубленного анализа многомерных данных качества воды применялись два независимых метода кластеризации: иерархическая кластеризация (НС) методом Ward.D2 (рис. 5) и методом К-средних (K-means) (рис. 6). Графики (рис. 5 и 6) показывают распределение точек данных по двум главным компонентам PC1 и PC2, которые объясняют 29.5% и 5.2% общей дисперсии соответственно.



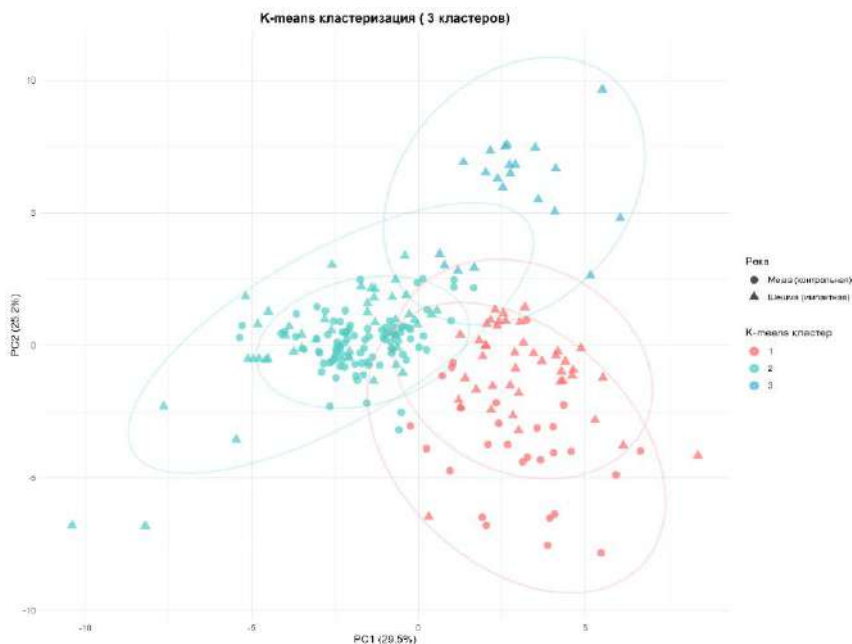
**Рисунок 5.** Иерархическая кластеризация методом Ward.D2 (НС)

Точки данных обозначены разными символами и цветами в зависимости от типа реки и кластера, к которому они принадлежат; контурные линии вокруг точек данных показывают границы кластеров

**Figure 5.** Hierarchical clustering (Ward.D2)

Data points are labeled with different symbols and colors depending on the river type and the cluster to which they belong; the contour lines around the data points indicate the cluster boundaries

Использование двух методов позволяет валидировать результаты и выявить прочные закономерности в структуре данных, которые воспроизводятся независимо от метода. На основании метода Elbow plot было определено, что оптимальное число кластеров составляет 3.



**Рисунок 6.** Кластеризация методом K-means с тремя кластерами

*Точки данных обозначены разными символами и цветами в зависимости от типа реки и кластера, к которому они принадлежат; контурные линии вокруг точек данных показывают границы кластеров*

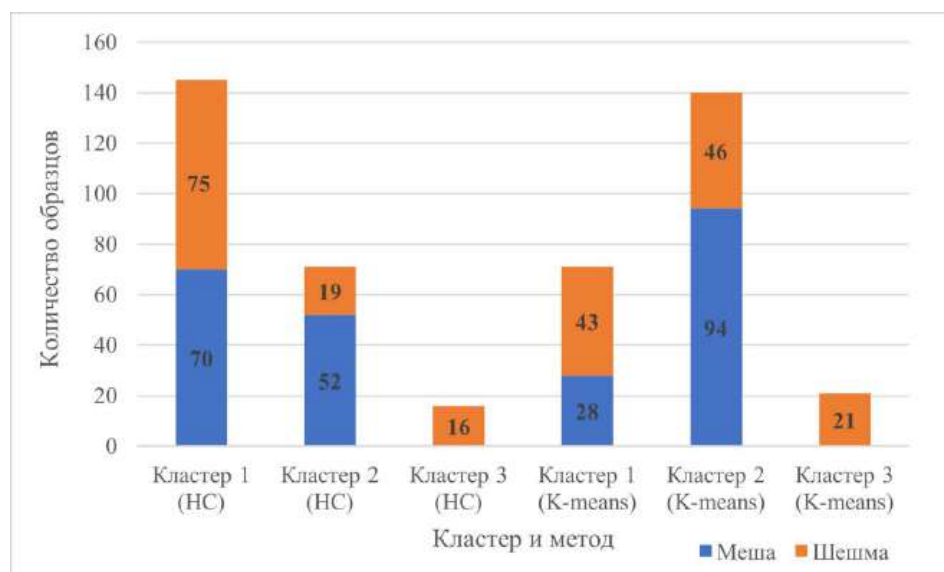
**Figure 6.** K-means clustering with three clusters

*Data points are identified by different symbols and colors depending on the river type and the cluster to which they belong; the contour lines around the data points indicate the cluster boundaries*

Оба метода показали похожие результаты, выделив 3 кластера (рис. 7) учитывающие степень антропогенного воздействия. Первый метод (НС) показал себя более успешно, так как он выделил группу отдельно стоящих проб в новый кластер. Данные пробы по результатам PCA были наиболее загрязненными.

В первый кластер вошли пробы со средним уровнем загрязнения. В данном кластере преобладают данные р. Шешмы. Второй кластер представлен преимущественно пробами из р. Мёши с небольшой долей проб из менее загрязненных участков р. Шешмы. 3 кластер представлен исключительно пробами из р. Шешмы, характеризуются высоким уровнем загрязнения.

Для оценки согласованности методов была построена матрица ошибок (confusion matrix), которая показала, что оба метода достигают хорошей согласованности в определении кластера 3. Тем не менее, появление в 3 кластере дополнительных точек может быть обусловлено тем, что метод К-средних «не видит» структуру «экстремальных» загрязнений, что делает его использование при анализе экологических данных затруднительным.



**Рисунок 7.** Сравнение результатов методами иерархической кластеризации (HC) и с использованием К-средних

**Figure 7.** Comparison of hierarchical clustering (HC) and K-means clustering results

Таким образом проведенный кластерный анализ позволяет выделить в реках 3 уровня загрязнения: условно-чистая вода ( $\approx 71$  проба), со средним уровнем загрязнения ( $\approx 140$  проб) и с высоким уровнем загрязнения ( $\approx 16$  проб). Отсутствие в 3 кластере проб из р. Мёши позволяет сделать вывод, что он выделен не на основе природной вариабельности воды, а обусловлен исключительно антропогенным воздействием. Это подтверждается тем, что он состоит из проб, разошедшихся по осям РСА далеко от основного облака. Расхождение по матрице ошибок в 69 пробах между HC-2 и K-means-1 (в кластерах 1 и 2) и их смещение обусловлено размытостью границ между условно-чистой и загрязненной водой.

Река Мёша, несмотря на наличие диффузного загрязнения, может быть отнесена к условно-чистой и ее можно использовать в качестве реки-сравнения в проведенном исследовании. К основным комплексным показателям, характеризующим воду как условно чистую, могут быть отнесены такие показатели как ХПК, СПАВ, ВВ, а также содержание элементов – Cd, As и Sr. Также в проведенном РСА данные сконцентрированы более плотно, демонстрируя стабильное, репрезентативное состояние с низкой внутривидовой вариабельностью.

В р. Шешме только 26-30% проб можно отнести к условно чистым. Река демонстрирует высокую вариабельность, что обусловлено антропогенным воздействием. Основным фактором для выделения 3 кластера послужили концентрации таких элементов как Ba ( $\cos^2 = 0.853$ ) и Sr ( $\cos^2 = 0.851$ ), уровень БПК<sub>5</sub> ( $\cos^2 = 0.810$ ), а также Zn ( $\cos^2 = 0.563$ ), Pb ( $\cos^2 = 0.535$ ) и минерализация ( $\cos^2 = 0.600$ ).

Проведена валидация результатов кластеризации гидрохимических данных рек Мёша (контрольная) и Шешма (исследуемая) с использованием четырех независимых метрик качества: Silhouette Score, Davies-Bouldin Index, Calinski-Harabasz Index и двумерного дисперсионный анализ ANOVA с post-hoc тестом Tukey HSD. Результаты показывают высокую статистическую значимость и хорошую качественную валидацию найденной структуры данных. Двумерный ANOVA показал статистически значимые различия между кластерами по PC1 ( $F_{2,229} = 78.04, p < 0.001$ ) и PC2 ( $F_{2,229} = 117.00, p < 0.001$ ). Post-hoc тест Tukey HSD подтвердил, что все три кластера попарно различаются ( $p < 0.01$ ), при этом границы между условно-чистой и загрязненной водой остаются размытыми ( $p = 0.06$ ).

Выделенная трехуровневая структура загрязнения (низкое → среднее → высокое) является статистически значимой, структурно обоснованной и методологически надежной.

### ***Выделение маркеров***

Загрязнение воды в результате нефтедобывающей деятельности объясняет только 5.5% общей многомерной вариации, это указывает на высокое содержание отдельных компонентов и их уровень превышает содержание аналогичных показателей в контрольной реке.

Гидрохимические данные по р. Мёше статистически более однородны (узкое облако NMDS), а вариабельность обусловлена, главным образом, сезонностью и пространственными различиями. К условно чистым относится 43% проб, к доминирующим факторам вариации относятся естественные геохимические процессы.

Гидрохимические данные р. Шешма, напротив, характеризуется высокой вариабельностью с выраженным "хвостом" экстремальных значений. К сильно загрязненным относится 14.5% всех проб, демонстрируя наличие точечных источников загрязнения. Вариабельность обусловлена взаимодействием естественных процессов формирования качества воды и антропогенным загрязнением.

На основе комплексного анализа данных были идентифицированы пять специфических маркеров нефтедобывающей деятельности (табл. 4), которые могут быть рекомендованы для улучшения действующей системы экологического мониторинга.

В качестве дополнительных маркеров можно использовать ВВ, медианальное значение которых примерно в 14 раз выше в р. Шешме, а также Ва ( $\cos^2=0.853$ ), одного из наиболее доминирующих показателей в PC1. Комбинированное применение маркеров позволяет уверенно идентифицировать влияние нефтедобывающей деятельности на качество поверхностных вод и дифференцировать антропогенное загрязнения от геохимического фона.

При организации мониторинга следует не только отслеживать такой параметр как превышение ПДК, но и анализировать превышение медианальных значений контрольных рек в 2-3 раза.

Таблица 4. Индикаторы нефтедобывающей деятельности

Table 4. Indicators of oil production activity

| Показатель                      | Содержание в воде |         | Отношение содержания в воде | Интерпретация                                                                                                      |
|---------------------------------|-------------------|---------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                 | Мёша              | Шешма   |                             |                                                                                                                    |
| Хлориды<br>мг·л <sup>-1</sup>   | 11.03             | 68.77   | 6.2                         | Входит в состав пластовых вод (Шипаева, 2025)                                                                      |
| Кадмий<br>мкг·л <sup>-1</sup>   | 0.017             | 1.29    | 76.0                        | Входит в состав сырой нефти (Osuji, Onojake, 2004)                                                                 |
| Свинец<br>мкг·л <sup>-1</sup>   | 0.35              | 6.11    | 17.5                        | Входит в состав сырой нефти (Osuji, Onojake, 2004)                                                                 |
| Молибден<br>мкг·л <sup>-1</sup> | 3.76              | 4.91    | 1.3                         | Присутствует в пластовых водах; вклад в PC1 = 5.22% (Мударисова, Пунанова, 2024; Скибицкая и др., 2019)            |
| Стронций<br>мкг·л <sup>-1</sup> | 1032.16           | 1267.01 | 1.2                         | Входит в состав нефтей и пластовых вод; $\cos^2 = 0.851$ ; асимметрия $\approx 0$ (Ибрагимов, 2011; Шипаева, 2025) |

**Модели прогноза**

Разработанная логистическая регрессионная модель для бинарной классификации («чистая вода» / «загрязненная вода»), описываемая уравнением (1), показала высокую дискриминирующую способность в классификации данных по степени техногенного воздействия ( $AUC = 0.9779$ , доверительный интервал 95%: 0.958–0.99).

$$P(\text{загрязнение}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 Cl + \beta_2 Mo + \beta_3 Sr)}} \quad , \quad (1)$$

где:

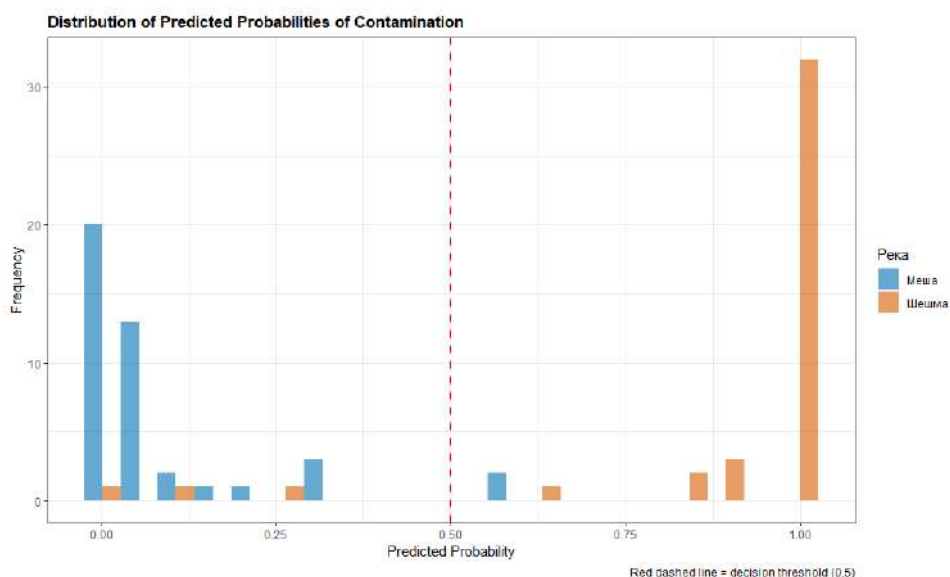
P – вероятность загрязнения (от 0 до 1).  $P > 0.5$  = "загрязнено"

$\beta_0 = -10.299$ ,  $\beta_1 = 0.1359$ ,  $\beta_2 = 2.0947$ ,  $\beta_3 = -0.0028$  – коэффициенты регрессии (оцениваются методом максимального правдоподобия);  $\text{logit}(P) = \ln(P/(1-P))$  – логарифм отношения шансов (от  $-\infty$  до  $+\infty$ ). Преобразует вероятность в линейную шкалу.

Модель достигла общей точности классификации 94.98% (78 из 83 проб), чувствительности 95.0% (38 из 40 загрязненных образцов) и специфичности 93.02% (40 из 42 чистых проб). Статистически значимыми предикторами загрязнения являются хлориды и Мо. Увеличение концентрации хлоридов на 1 мг/л ассоциировалось с увеличением логит-отношения шансов

загрязнения на 0.136 единиц ( $z = 3.59, p < 0.001$ ), что соответствует увеличению шансов загрязнения на 14.6% ( $OR = 1.15$ ; 95%  $CI$ : 1.07–1.22). Мо показал значительно более сильный эффект: увеличение концентрации на 1 мкг·л<sup>-1</sup> увеличивало шансы загрязнения в 8.12 раз ( $\beta = 2.095, OR = 8.12$ ; 95%  $CI$ : 1.82–36.32,  $z = 2.73, p = 0.006$ ). Стронций не показал статистически значимого влияния на риск загрязнения ( $\beta = -0.003, p = 0.085$ ).

Модель дерева решений показала еще более высокие показатели классификации, достигнув точности 98.80% (82 из 83 проб), чувствительности 100% (41 из 41 загрязненных проб) и специфичности 97.67% (41 из 42 чистых проб). Модель идеально определила все загрязненные образцы без ложных отрицательных результатов, допустив только 1 ложное положительное значение (рис. 8).



**Рисунок 8.** Распределение предсказанных вероятностей загрязнения  
Ось  $X$  показывает предсказанную вероятность загрязнения  $P$  ( $0$  = чистая,  $1$  = загрязненная), ось  $Y$  – частоту (количество проб). Красная пунктирная линия отмечает порог равный  $0.5$ , который разделяет пробы на «чистые» и «загрязненные»

**Figure 8.** Distribution of predicted contamination probabilities  
The  $x$ -axis shows the predicted probability of contamination  $P$  ( $0$  = clean,  $1$  = contaminated), and the  $y$ -axis shows the frequency (number of samples). The red dotted line marks the threshold of  $0.5$ , which separates the samples into “clean” and “contaminated”

Ранговый анализ важности переменных показал доминирующую роль хлоридов в классификации загрязнения (важность = 39.54, что составляет 47.6% от общей информационной ценности), за которыми следуют Мо (14.78, 17.8%) и Sr (12.94, 15.6%). Основное правило разделения в корневом узле дерева: концентрация хлоридов  $< 30.1$  мг л<sup>-1</sup> классифицирует воду как чистую (класс 0, р. Мёша), концентрация  $\geq 30.1$  мг л<sup>-1</sup> – как загрязненную (класс 1, р. Шешма). Это пороговое значение хорошо согласуется с данными по р. Мёше, где максимальное значение содержания хлоридов составляет 26.9 мг л<sup>-1</sup>.

Доминирующая роль хлоридов как индикатора может быть объяснена несколькими факторам: 1. хлориды ассоциированы с нефтедобывающей деятельностью; 2. хлориды отличаются консервативным поведением в речных экосистемах (слабо участвуют в химических и биологических процессах); 3. концентрация хлоридов в р. Мёше ( $11.26 \pm 0.36$  мг л<sup>-1</sup>) существенно отличается от значения в р. Шеше ( $63.45 \pm 2.51$  мг л<sup>-1</sup>), что обеспечивает четкое разделение классов в моделях.

Mo, демонстрирующий второе место по важности (14.78) и наибольшее отношение шансов (*OR*) равное 8.12, также является значимым индикатором антропогенного воздействия со стороны нефтедобывающей деятельности. *Sr* не показал статистически значимого влияния ( $p=0.085$ ), но его присутствие в модели не ухудшает её производительность и может быть полезным для контроля геохимических факторов.

## Выводы

Комплексный подход, объединяющий анализ главных компонент (PCA), пермутационный многомерный анализ дисперсии (PERMANOVA) и классификационные модели (логистическая регрессия и дерево решений), продемонстрировал высокую эффективность для идентификации гидрохимических маркеров нефтяного загрязнения водных объектов.

К основным преимуществам используемой методологии можно отнести статистическую робастность (независимые методы взаимно подтверждают различие между исследуемым объектом и объектом сравнения), выделение специфических маркеров и дифференциацию источников нагрузки с использованием кластеризации (НС, K-means) и ANOVA, позволивших разделить пробы по уровню загрязнения, исключив природную вариабельность. Предлагаемая методология может быть адаптирована для других нефтедобывающих регионов РФ. Результаты исследования могут быть использованы в процедурах установления ответственности за накопленный экологический ущерб.

По результатам исследования рекомендовано включить в систему производственного мониторинга нефтегазодобывающих управлений специфические индикаторы: триаду маркеров (хлориды-Mo-Sr), используемую в регрессионной модели, а также Cd и Pb. При принятии управленческих решений предлагается руководствоваться не только ПДК, но и превышением медианных значений контрольных рек более 2 раз.

Разработанные классификационные модели (логистическая регрессия и дерево решений) на основе трех гидрохимических показателей (хлориды, Mo, Sr) обеспечивают эффективную диагностику техногенного загрязнения вод рек региона с точностью 94-99%.

*Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.*

---

## Список литературы

Ананьев, А.Н., Комяков, Ю.А., Литвишко В.Г. (1978) *Утяжелитель для буровых растворов на нефтяной основе*, Авторское свидетельство № 601299 А1 СССР, МПК С09К 8/32, № 2121277.

*Водные объекты Республики Татарстан. Гидрографический справочник* (2018) Казань, изд-во «Фолиант», 512 с.

Гарелина, С.А. (2025) Комплексное решение для защиты береговой полосы Черного моря от разливов нефти и нефтепродуктов (мазута), *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*, № 3(66), с. 22-31.

Ермолаев, О.П., Игонин, М.Е., Бубнов, А.Ю., Павлова, С.В. (2007) *Ландшафты Республики Татарстан. Региональный ландшафтно-экологический анализ*, Казань, Слово, 441 с.

Ибрагимов, Р.Л. (2011) Оценка возможности использования подземных вод нефтяных месторождений Республики Татарстан в качестве гидроминерального сырья, *Георесурсы, геознергетика, геополитика*, № 2(4), URL: [https://oilgasjournal.ru/vol\\_4/ibragimov.pdf](https://oilgasjournal.ru/vol_4/ibragimov.pdf) (дата обращения: 22.02.2026).

Кленкин, А.А., Агапов, С.А. (2011) Динамика распределения нефтепродуктов в воде и донных отложениях Азовского и Черного морей после аварии судов в Керченском проливе, *Водные ресурсы*, т. 38, № 2, с. 214-222.

Лешкович, Н.М., Арнбрехт, А.Э., Викулов, Г.Е. (2020) Воздействие нефтегазового комплекса на окружающую среду, *Булатовские чтения*, т. 5. с. 138-141.

Мударисова, Р.А., Пунанова, С.А. (2024) Особенности образования залежи и состава сверхвязкой нефти Горского месторождения Республики Татарстан, *Экспозиция Нефть Газ*, № 8, с. 28-33, doi: 10.24412/2076-6785-2024-8-28-33.

Рахматуллин, Н.Р., Сулейманов, Р.А., Валеев, Т.К. (2023) Пути совершенствования системы производственного и природоохранного контроля при разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений морского шельфа, *Тенденции развития науки и образования*, № 98-7, с. 129-133, doi: 10.18411/tmio-06-2023-390.

РД 52.24.353-12 (2012) *Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод*, Ростов на Дону, 40 с.

Скибицкая, Н.А., Бурханова, И.О., Большаков, М.Н., Навроцкий, О.К. (2019) Перспективность нефтегазоконденсатных и газоконденсатных месторождений как источников полиметаллического сырья, *Актуальные проблемы нефти и газа*, 1(24), URL: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art6> (дата обращения: 22.02.2026).

Титов, В.Н., Ходов, Д.А. (2015) Основные экологические проблемы нефтяного комплекса Саратовской области, *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, № 3, с. 35-40.

---

Шипаева, М.С. (2025) *Геохимический мониторинг подземных вод нефтяных месторождений для повышения эффективности их разработки (на примере Республики Татарстан)*, дисс. ... канд. геол.-мин. наук, Казань, 147 с.

Bakke, T., Klungsoyr, J., Sanni, S. (2013) Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry, *Marine Environmental Research*, vol. 92, pp. 154-169.

Jones, K.L., Ziegler, B.A., Davis, A.M., Cozzarelli, I.M. (2023) Attenuation of Barium, Strontium, Cobalt, and Nickel Plumes Formed during Microbial Iron Reduction in a Crude-Oil-Contaminated Aquifer ACS, *Earth and Space Chemistry*, vol. 7(7), pp. 1322-1336, doi: 10.1021/acsearthspacechem.2c00387.

Osuji, LC, Onojake, CM. (2004) Trace heavy metals associated with crude oil: a case study of Ebocha-8 oil-spill-polluted site in Niger Delta, Nigeria, *Chem Biodivers*, vol. 1(11), pp. 1708-1715, doi: 10.1002/cbdv.200490129. PMID: 17191811.

Wang, F., Zhao, T., Yang, J.Z., et al. (2024) Research on the identification method of barium toxic substance content of polysulfonate cuttings and reducing soils, *Journal of Environmental Engineering Technology*, vol. 14(6), pp. 1969-1976, doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20240266.

Yusta-García, R., Orta-Martínez, M., Mayor, P., González-Crespo, C., Rosell-Melé A. (2017) Water contamination from oil extraction activities in Northern Peruvian Amazonian rivers, *Environmental Pollution*, vol. 225, pp. 370-380.

## References

Ananyev, A.N., Komyakov, Yu.A., Litvishko, V.G. (1978) *Utyazhelitel' dlya burovykh rastvorov na neftyanoy osnove* [Weighting agent for oil-based drilling fluids], USSR, Pat. 601299 A1, IPC C09K 8/32, no. 2121277.

*Vodnyye ob'yekty Respubliki Tatarstan: Gidrogeograficheskiy spravochnik* [Water bodies of the Republic of Tatarstan: Hydrographic reference book] (2018) Foliant, Kazan, Russia, 512 p.

Garelina, S.A. (2025) *Kompleksnoye resheniye dlya zashchity beregovoy polosy Chernogo morya ot razlivov nefi i nefteproduktov (mazuta)* [Comprehensive solution for coastal protection the Black sea from oil spills and petroleum products (fuel oil)], *Nauchnyye i obrazovatel'nyye problemy grazhdanskoy zashchity*, no. 3(66), pp. 22-31.

Yermolaev, O.P., Igonin, M.E., Bubnov, A.Yu., Pavlova, S.V. (2007) *Landshafty Respubliki Tatarstan. Regional'nyy landshaftno-ekologicheskii analiz* [Landscapes of the Republic of Tatarstan. Regional landscape-ecological analysis], Slovo, Kazan, Russia, 441 p.

Ibragimov, R.L. (2011) *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya podzemnykh vod neftyanykh mestorozhdeniy Respubliki Tatarstan v kachestve gidromineral'nogo*

syr'ya [Assessment of the possibility of using groundwater from oil fields of the Republic of Tatarstan as hydromineral raw materials], *Actual Problems of Oil and Gas*, no. 2(4), available at: [https://oilgasjournal.ru/vol\\_4/ibragimov.pdf](https://oilgasjournal.ru/vol_4/ibragimov.pdf) (accessed 22 Feb 2026).

Klenkin, A.A., Agapov, S.A. (2011) Dinamika raspredeleniya nefteproduktov v vode i donnykh otlozheniyakh Azovskogo i Chernogo morey posle avarii sudov v Kerchenskom prolive [Dynamics of oil product distributions in water and bottom sediments of the Sea of Azov and the Black Sea after ship accidents in the Kerch Strait], *Water Resources*, vol. 38, no. 2, pp. 214-222.

Leshkovich, N.M., Arnbrekht, A.E., Vikulov, G.E. (2020) Vozdeystviye neftegazovogo kompleksa na okruzhayushchuyu sredu [Environmental impact of the oil and gas complex], *Bulatovskiy chteniya*, vol. 5, pp. 138-141.

Mudarisova, R.A., Punanova, S.A. (2024) Osobennosti obrazovaniya zalezhi i sostava sverkhv'yazkoy nefi Gorskogo mestorozhdeniya Respubliki Tatarstan [Peculiarities of the formation of the deposit and composition of ultraviscous oil Gorsky field of the Republic of Tatarstan], *Exposition Oil Gas*, issue 8, pp. 28-33, doi: 10.24412/2076-6785-2024-8-28-33.

Rakhmatullin, N.R., Suleymanov, R.A., Valeyev, T.K. (2023) Puti sovershenstvovaniya sistemy proizvodstvennogo i prirodookhrannogo kontrolya pri razrabotke i ekspluatatsii neftegazovykh mestorozhdeniy morskogo shel'fa [Ways to improve the system of industrial and environmental control in the development and operation of offshore oil and gas fields], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, vol. 98, issue 7, pp. 129-133, doi: 10.18411/trnio-06-2023-390.

RD 52.24.353-12 (2012) *Otbor prob poverkhnostnykh vod sushi i ochishchennykh stochnykh vod* [Sampling of inland surface waters and treated wastewater], Rostov-on-Don, Russia, 40 p.

Skibitskaya, N.A., Burkhanova, I.O., Bol'shakov, M.N., Navrotskiy, O.K. (2019) Perspektivnost' neftegazokondensatnykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy kak istochnikov polimetallicheskogo syr'ya [Prospectivity of oil-gas-condensate and gas-condensate fields as polymetallic feedstock sources], *Actual Problems of Oil and Gas*, issue. 1(24), available at: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art6> (accessed 22 Feb 2026).

Titov, V.N., Khodov, D.A. (2015) Osnovnyye ekologicheskiye problemy neftyanogo kompleksa Saratovskoy oblasti [The main environmental problems of the oil industry in Saratov region], *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, issue 3, pp. 35-40.

Shipaeva, M.S. (2025) *Geokhimicheskii monitoring podzemnykh vod neftyanykh mestorozhdeniy dlya povysheniya effektivnosti ikh razrabotki (na primere Respubliki Tatarstan)* [Geochemical monitoring of groundwater in oil fields to improve the efficiency of their development (case study of the Republic of Tatarstan)], Candidate's thesis, Kazan Federal University, Kazan, Russia, 147 p.

Bakke, T., Klungsøyr, J., Sanni, S. (2013) Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry, *Marine Environmental Research*, vol. 92, pp. 154-169.

Jones, K.L., Ziegler, B.A., Davis, A.M., Cozzarelli, I.M. (2023) Attenuation of Barium, Strontium, Cobalt, and Nickel Plumes Formed during Microbial Iron Reduction in a Crude-Oil-Contaminated Aquifer ACS, *Earth and Space Chemistry*, vol. 7(7), pp. 1322-1336, doi: 10.1021/acsearthspacechem.2c00387.

Osuji, LC, Onojake, CM. (2004) Trace heavy metals associated with crude oil: a case study of Ebocha-8 oil-spill-polluted site in Niger Delta, Nigeria, *Chem Biodivers*, vol. 1(11), pp. 1708-1715, doi: 10.1002/cbdv.200490129. PMID: 17191811.

Wang, F., Zhao, T., Yang, J.Z. (2024) Research on the identification method of barium toxic substance content of polysulfonate cuttings and reducing soils, *Journal of Environmental Engineering Technology*, vol. 14(6), pp. 1969-1976, doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20240266.

Yusta-García, R., Orta-Martínez, M., Mayor, P., González-Crespo, C., Rosell-Melé A. (2017) Water contamination from oil extraction activities in Northern Peruvian Amazonian rivers, *Environmental Pollution*, vol. 225, pp. 370-380.

Статья поступила в редакцию (Received): 02.03.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 18.03.2026.

### **Для цитирования / For citation:**

Новикова, Л.В., Степанова, Н.Ю. (2026) Использование многомерного анализа для выделения гидрохимических маркеров антропогенного воздействия, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 133-155, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-133-155.

Novikova, L.V., Stepanova N.Yu. (2026) Using multidimensional analysis to identify water pollution markers, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 3-4, pp. 133-155, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-133-155.

## Утилизация и обезвреживание лекарственных средств как основа экологической безопасности в республике Беларусь

*М.М. Максимович<sup>1)</sup>, М.А. Прохоцкая<sup>2)</sup>, С.Н. Шнитко<sup>3)</sup>, М.М. Сачек<sup>4)</sup>,  
Т.И. Терехович<sup>5)</sup>\**

<sup>1)</sup> Учреждение здравоохранения «25-я центральная районная поликлиника  
Московского района г. Минска»,  
Республика Беларусь, 220051, г. Минск, ул. Рафиева, 60

<sup>2)</sup> Государственное учреждение «Республиканский центр организации медицинского  
реагирования»,  
Республика Беларусь, 220030, г. Минск, ул. Мясникова, 39

<sup>3)</sup> Военно-медицинский институт в учреждении образования  
«Белорусский государственный медицинский университет»,  
Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 71

<sup>4)</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»,  
Республика Беларусь, 220116, г. Минск, пр. Дзержинского, 83

<sup>5)</sup> Государственное учреждение «Республиканский научно-практический центр медицинской  
экспертизы и реабилитации»,  
Республика Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Макаенка, 17

\*Адрес для переписки: [tt\\_gem@mail.ru](mailto:tt_gem@mail.ru)

**Резюме.** Эффективные способы обезвреживания и корректная утилизация лекарственных средств являются важным аспектом здоровья человека и окружающей среды. В статье изложена актуальность проблемы, организация и подходы к утилизации лекарственных средств в Республике Беларусь.

**Ключевые слова.** Лекарственные средства, утилизация, охрана окружающей среды.

## Disposal and neutralization of medicines as a basis for environmental safety in the republic of Belarus

*M.M. Maksimovich<sup>1)</sup>, M.A. Prakhotskaya<sup>2)</sup>, S.N. Shnitko<sup>3)</sup>, M.M. Sachek<sup>4)</sup>,  
T.I. Tserakhovich<sup>5)</sup>*

<sup>1)</sup> Health care institution "25<sup>th</sup> central district clinic of the Moskovsky district of Minsk",  
60, Rafieva str., 220051, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2)</sup> The State institution "Republican Center for the Organization of medical response", 39,  
Myasnikova str., 220030, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3)</sup> Military Medical Institute at the educational institution "Belarusian State Medical University",  
71, Nezavisimosti avenue, 220013, Minsk, Republic of Belarus

<sup>4)</sup> Educational institution "Belarusian State Medical University",  
83, Dzerzhinsky avenue, 220116, Minsk, Republic of Belarus

<sup>5)</sup> The State Institution "Republican Scientific and Practical Center for Medical Expertise and  
Rehabilitation",  
17, Makayenka str., 220114, Minsk, Republic of Belarus

\*Correspondence address: *tt\_gem@mail.ru*

**Abstract.** Effective methods of neutralization and correct disposal of medicines are an important aspect of human health and the environment. The article describes the relevance of the problem, organization and approaches to the disposal of medicines in the Republic of Belarus.

**Keywords.** Medicines, disposal, environmental protection.

Устойчивое развитие можно представить как совокупность взаимосвязанных элементов – экономика, экология и население, которые развиваются в непосредственном взаимодействии, создавая благоприятные условия для существования человека и природных ресурсов в будущем. Потребность в устойчивом развитии возникла в конце XX века, когда стало заметным ухудшение состояния окружающей среды в результате техногенного воздействия человека на природу. В 2015 году государствами-членами ООН была принята Повестка в области устойчивого развития до 2030 года. Цели устойчивого развития (далее – ЦУР) – это глобальные ориентиры для государств мира, и каждая из 193 стран мира должна стремиться к их выполнению для достижения максимального эффекта в улучшении благополучия населения, окружающей среды и экономики. Согласно Глобальному отчету об устойчивом развитии, в 2025 г. Беларусь заняла 32-е место из 167 стран в международном рейтинге достижения ЦУР (The Sustainable Development Goals Report, 2025).

Современные глобальные вызовы выдвигают на первый план вопросы обеспечения экологически безопасной среды проживания, рационального использования природного капитала, предотвращения деградации земель, защиты населения от вредных воздействий техногенного характера и др. Вопросы, связанные с экологической безопасностью, обозначены и в Концепции национальной безопасности Республики Беларусь. Среди внутренних источников угроз отмечены: повышенные уровни выбросов и сбросов загрязняющих веществ, образования отходов; недостаточное развитие правовых и экономических механизмов обеспечения экологической безопасности, систем учета природных ресурсов, качества окружающей среды. К основным направлениям нейтрализации внутренних источников угроз национальной безопасности относят разработку и внедрение экологически безопасных технологий; развитие национальной системы мониторинга окружающей среды, формиро-

---

вание рынка экосистемных услуг, внедрение эффективной нормативной правовой базы экологической безопасности<sup>1)</sup>.

Лекарства являются спутником и важным фактором развития человека, неотъемлемой составляющей медицинской практики. Их применение обеспечивает сохранение здоровья населения и приводит к повышению качества и продолжительности жизни. В настоящее время разработка новых лекарств и их производство превратились в мощную отрасль науки и промышленности. Так, мировой рынок специализированных фармацевтических препаратов в 2024 году оценивался в 226.7 млрд долларов США. Ожидается, что он вырастет с 285.1 млрд долларов США в 2025 году до 2.37 трлн долларов США в 2034 году (среднегодовой темп роста 26.5%). Это обусловлено возрастающей распространенностью хронических неинфекционных и редких заболеваний, достижениями в области биологических препаратов и генной терапии, увеличением финансирования в научные исследования и разработки<sup>2)</sup>.

Следует подчеркнуть, что одним из основных принципов государственной политики Республики Беларусь в области здравоохранения является обеспечение доступности медицинского обслуживания, в том числе лекарственного обеспечения<sup>3),4)</sup>.

Реализации этому способствует активное развитие фармацевтической промышленности. Сегодня в Республике Беларусь лекарственные препараты производят более 40 фармпредприятий, которые выпускают порядка 1800 наименований лекарственных препаратов различных фармакотерапевтических групп. В 2024 году отечественными производителями на внутреннем рынке зарегистрировано 67 новых отечественных лекарственных препаратов.

Вместе с тем, производство и использование лекарств оказывают значительное влияние на окружающую среду (Wilkinson et al., 2022). При количественном и качественном росте фармацевтической промышленности и широком применении лекарств неизбежно попадание препаратов в окружающую среду. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, 631 наименование лекарственных препаратов и их метаболитов обнаружено в воде 71 страны мира, при этом 16 лекарственных веществ выявлены в воде питьевого качества. Среди них такие распространенные препараты, как диклофенак, ибупрофен, парацетамол, аспирин, кетопрофен, напроксен, стероиды. Список токсичности для всего живого возглавляют противоопухоле-

---

<sup>1)</sup> Решение Всебелорусского народного собрания от 25 апреля 2024 г. № 5 «Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь», URL: <https://pravo.by/document/?guid=11031&p0=P924v0005>.

<sup>2)</sup> Рынок специализированных фармацевтических препаратов – по типу препарата, по терапевтической области, по пути введения, по каналу сбыта глобальный прогноз на 2025-2034 гг., URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/specialty-pharmaceuticals-market> (дата обращения 04.2025).

<sup>3)</sup> Закон Республики Беларусь от 18 июня 1993 г. № 2435-XII «О здравоохранении» (в редакции Закона Республики Беларусь от 8 июля 2024 г. № 26-З).

<sup>4)</sup> Закон Республики Беларусь от 20 июля 2006 г. № 161-З «Об обращении лекарственных средств» (в редакции Закона Республики Беларусь от 14 октября 2022 г. № 213-З).

---

вые препараты (цитостатики), лекарственные средства для лечения ВИЧ/СПИД и туберкулеза, а также наркотики и психотропные лекарственные средства. Все лекарственные препараты относятся к отдельному классу отходов, требующих специальной утилизации. Неопасными, полностью разлагающимися в природе считаются только витамины, питательные смеси и препараты для лечебного питания.

Среди наиболее возможных и крупных источников такого загрязнения можно выделить само производство лекарственных препаратов (при недостаточной очистке стоков, при аварийных ситуациях и др.), организации здравоохранения и аптеки (при неправильной утилизации медицинских отходов), исследовательские центры, где создаются и изучаются новые лекарства. Наконец, сам человек вносит свой вклад в лекарственное загрязнение окружающей среды при выводе части лекарств и их метаболитов из организма, выбрасывании просроченных лекарств, использованных шприцов, ампул и т.д.

В начале XXI в. Европейское агентство по окружающей среде (ЕЕА) обозначило влияние активных фармацевтических субстанций на окружающую среду как новую экологическую проблему. Стремительное развитие фармацевтической отрасли в последние годы также создает потенциальную возможность и приводит к образованию и накоплению фармацевтических отходов. По определению ВОЗ, фармацевтические отходы – неустраиваемые фармацевтические препараты или препараты с истекшим сроком годности; предметы, загрязненные фармацевтическими препаратами или содержащие фармацевтические препараты<sup>5</sup>).

Учитывая постоянный рост объемов потребления лекарственных препаратов при отсутствии адекватных мер реагирования, в ближайшие годы можно ожидать ухудшения ситуации (Felicity, 2017). Масштабные исследования в данном направлении начались только в середине 90-х гг. прошлого века (Баренбойм, Чиганова, 2012), когда присутствие фармполлютантов в природных экосистемах стали рассматривать как новую экологическую проблему (Мухутдинова и др., 2015). Этот период ознаменовался не только развитием производства и ростом потребления лекарств, но и активным внедрением новых аналитических методов, позволяющих выявлять даже следовые количества лекарственных средств. В настоящее время работы по мониторингу окружающей среды с целью обнаружения в ней фармацевтических субстанций ведутся во многих странах мира (Баренбойм, Чиганова, 2012). Фармацевтическое загрязнение окружающей среды тесно связано с ростом потребления лекарственных препаратов, и этому, способствуют такие факторы, как демографическое старение, все большее распространение хронических неинфекционных заболеваний, доступность недорогого лечения дженериками и появление новых лекарственных препаратов (Есипов, Абушинов, 2018; Петрухина и др., 2023; Wilkinson et al., 2022).

---

<sup>5</sup>ВОЗ: Медицинские отходы (2024) URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste> (дата обращения 24.10.2024).

---

По данным STEPS-исследования, проведенного в Республике Беларусь в 2020 году, в котором приняло участие 5324 жителя страны, потребность в лекарственных средствах за последние 12 месяцев была установлена у 95.5% лиц, обращавшихся в организации здравоохранения. Среди женщин данный показатель был незначительно выше (96.5%), нежели среди мужчин (94.3%). Потребность в лекарственных средствах возростала с 91.2% в группе лиц 18-29 лет до 99.7% в группе лиц 60-69 лет (STEPS: Распространенность факторов риска ..., 2022). Ежегодно каждый житель Республики Беларусь приобретает более 30 упаковок лекарственных средств. Первое место по продажам принадлежит нестероидным противовоспалительным средствам, на втором месте – антимикробные препараты.

Применение лекарственных препаратов не всегда продиктовано реальной необходимостью. Результаты исследований, проведенных во всем мире, показывают, что около 50% всех лекарственных препаратов назначается, распределяется или реализуется ненадлежащим образом, а половина пациентов не принимают препараты в соответствии с предписаниями врача. Иногда лекарственные препараты, вопреки инструкции, используются не только в лечебных, но и в профилактических целях (Felicity, 2017). В ряде случаев потребители самостоятельно приобретают для себя лекарства из так называемой категории lifestyle, предназначенные для поднятия настроения, улучшения внешнего вида и пр. Кроме того, по данным Европейской федерации фармацевтической промышленности и ассоциаций (EFPIA), от 3% до 8% проданных лекарственных препаратов остаются неиспользованными, а по некоторым данным, этот показатель существенно выше и может достигать 50%, как, например, во Франции и Великобритании<sup>6)</sup>. Реклама и широкий доступ к Интернет-источникам обеспечивают более активное проникновение лекарственных препаратов в нашу повседневную жизнь, а иногда способствуют переходу лекарств в разряд товаров широкого потребления (Felicity, 2017).

Объем мирового рынка безрецептурных препаратов в 2024 году оценивался в 180.1 млрд долларов США. Ожидается, что он вырастет с 187.2 млрд долларов США в 2025 году до 308.8 млрд долларов США в 2034 году при среднегодовом темпе роста 5.7% в период с 2025 по 2034 год<sup>7)</sup>. В первую очередь это связано с растущей склонностью потребителей к самолечению. Согласно исследованиям, распространенность самолечения стремительно растет – от 11.2% до 93.7%.

Аналогичным образом, в Journal of Environmental and Public Health сообщалось, что в Индии более 50% населения занимается самолечением. Из-за широкого распространения самолечения люди стали покупать безрецептур-

---

<sup>6)</sup>Final Report Study on the environmental risks of medicinal products. 2013. Executive Agency for Health and Consumers. 12 December 2013.

<sup>7)</sup>Рынок специализированных фармацевтических препаратов – по типу препарата, по терапевтической области, по пути введения, по каналу сбыта глобальный прогноз на 2025-2034 гг. URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/specialty-pharmaceuticals-market> (дата обращения 04.2025).

ные лекарства, что привело к расширению рынка. В Республике Беларусь около 800 лекарственных препаратов отнесены к категории отпускаемых без рецепта врача<sup>8), 9)</sup>.

Белорусы тоже прибегают к самолечению. Так, по данным социологического исследования, проведенного Институтом социологии Национальной академии наук Беларуси в конце 2023 года, на вопрос «Куда Вы обращаетесь за оказанием медицинской помощи?» 6.3% опрошенных не обращаются никуда, т.е. выбирают самостоятельное лечение, два года назад – это было 4.7%<sup>10)</sup>. Проведенное нами в 2022 году исследование, в котором участвовали 1498 женщин, имеющих детей показало, что «...только врачу в выборе лекарственного препарата...» доверяют 24.2% респондентов, а ответы с комбинацией, содержащей слово «врач» выбрали 58.7%. На вопрос «Всегда ли вы следуете рекомендациям врача?» ответ «да» дали только 20% опрошенных (Романова, 2023).

Среди факторов роста отмечают растущую осведомленность потребителей о самолечении и профилактике заболеваний, доступность информации, высокую стоимость рецептурных препаратов, которая приводит к переходу на безрецептурные, благоприятную нормативно-правовую базу регистрации безрецептурных препаратов, расширение доступности. На рынке набирает обороты популярность онлайн-аптек, которые обеспечивают удобство и простату покупки безрецептурных препаратов.

Кроме того, отдельные лекарственные препараты применяются не только в медицинской практике, но и в других отраслях деятельности человека, таких как ветеринария, птицеводство, рыбоводческое хозяйство (Мухутдинова и др., 2015). Все это приводит к чрезмерному распространению лекарственных препаратов в окружающей среде и может оказывать влияние на ее состояние. С экологической точки зрения ключевые этапы жизненного цикла лекарственных средств включают производство и потребление, а также управление отходами. Загрязнение окружающей среды возможно на каждом из этих этапов, но происходит в основном в процессе их использования. Установлено, что от 30 до 90% орально применяемых препаратов и их производных попадают в виде активных метаболитов во внешнюю среду в составе мочи (в среднем  $64 \pm 27\%$ ); часть продуктов метаболизма лекарственных

---

<sup>8)</sup>Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 29 декабря 2015 г. № 178 с изменениями и дополнениями «О Правилах определения категорий лекарственных препаратов, отпускаемых без рецепта и по рецепту», URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=F91500371>.

<sup>9)</sup>Об установлении перечня лекарственных препаратов, реализуемых без рецепта врача Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 10 апреля 2019 г. № 27 (в редакции Постановления Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 14 июня 2023 г. № 101).

<sup>10)</sup>Мнение населения Республики Беларусь о системе здравоохранения (2025) Институт социологии Республики Беларусь, URL: <https://socio.bas-net.by/rezultaty-sotsiologicheskogo-issledovaniya-sredi-naseleniya-belarusi-po-voprosam-raboty-sistemy-zdravoohraneniya/> (дата обращения 04.04.2025).

---

средств выводится с каловыми массами (в среднем  $35\pm 26\%$ ). Причиной загрязнения нередко становится и некорректная утилизация неиспользованных лекарственных препаратов препаратов<sup>6)</sup>.

Загрязнение окружающей среды лекарственными препаратами и связанные с ним потенциальные риски для здоровья человека стали стимулом для разработки в странах специальных законодательных актов и нормативных документов (Прожерина, 2017).

Безопасное управление медицинскими отходами имеет фундаментальное значение для предоставления высококачественной медицинской помощи, ориентированной на человека, а также для обеспечения защиты пациентов и персонала и охраны окружающей среды. В соответствии с Целями в области устойчивого развития ООН (ЦУР)<sup>11)</sup>, особенно с Целью 3 «Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте», Целью 6 «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» и Целью 12 «Обеспечение перехода к рациональным моделям потребления и производства», был разработан Глобальный план действий ВОЗ/ЮНИСЕФ в области водоснабжения, санитарии и гигиены (WASH) в медицинских учреждениях, направленный на обеспечение всех медицинских учреждений основными услугами WASH к 2030 г. (WHO/UNICEF, 2016). В их число входит безопасная утилизация медицинских отходов, в том числе их сортировка, сбор, транспортировка, обработка и удаление<sup>12)</sup>.

В Республике Беларусь обращение с медицинскими отходами, к которым отнесены и фармацевтические отходы, регулируется законом «Об обращении с отходами»<sup>13)</sup> и иными нормативными правовыми актами<sup>14),15),16)</sup>. Порядок обращения с медицинскими отходами определен постановлением Министерства здравоохранения и Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды. Документами упорядочен ряд таких понятий как

---

<sup>11)</sup>Цели устойчивого развития (2015) URL: <https://www.ungeneva.org/ru/about/topics/sustainable-development-goals>.

<sup>12)</sup>ВОЗ: Безопасное управление отходами медико-санитарной деятельности. Краткая информация. Женева: Всемирная организация здравоохранения; 2017 г. (WHO/FWC/WSH/17.05). Лицензия: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

<sup>13)</sup> Закон Республики Беларусь от 20.07.2007 № 271-З: с изменениями и дополнениям «Об обращении с отходами».

<sup>14)</sup>Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22.12.2009 № 1677: с изменениями и дополнениями «О порядке и условиях хранения, транспортировки, приостановления реализации и медицинского применения, изъятия из обращения, возврата производителю или поставщику, уничтожения лекарственных средств».

<sup>15)</sup>Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 29.11.2019 № 41/108/65: с изменениями и дополнениями «О порядке установления степени опасности отходов производства и класса опасности опасных отходов производства».

<sup>16)</sup>Приказ Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 30.12.2020 № 1409: с изменениями и дополнениями «Об утверждении порядка уничтожения наркотических средств и психотропных веществ».

---

«фармацевтические отходы», «отходы, образовавшиеся при работе с цитостатическими лекарственными средствами», «химиотерапевтические лекарственные средства» и отдельная глава документа касается особенностей обращения с фармацевтическими отходами в организациях<sup>17)</sup>.

Министерством здравоохранения и Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды при поддержке исполнительной власти, общественных организаций создана система сбора отходов лекарственных средств от населения. Их необходимо сдавать в специализированные пункты сбора лекарств, а также в специализированные контейнеры.

Продвижению данного вопроса способствовала инициатива «Природа без фармацевтических отходов», которая реализовывалась в 2019-2020 гг. некоммерческим учреждением «Центр экологического и социального развития», основная цель которой – снижение влияния бытовых медицинских отходов (просроченных лекарств) на окружающую среду и здоровье человека путем создания системы их раздельного сбора и утилизации, а также изменение культуры потребления лекарственных средств населением. Стартовав, как информационная компания нескольких активистов, инициатива быстро переросла в национальный волонтерский проект, который охватил практически все области Республики Беларусь. За 16 месяцев информационной кампании было установлено более 50 контейнеров в 30 населенных пунктах Республики Беларусь и собрано свыше 645 килограммов лекарственных препаратов с истекшим сроком годности. Деятельность инициативы косвенно способствовала изменению правовых и нормативно-правовых документов Республики Беларусь<sup>18)</sup>.

Так, в 2020 году был введен ТКП (Технический кодекс установившейся практики) 17.11-08-2020 (33040/33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Правила обращения с коммунальными отходами», который четко закрепил ответственных лиц и порядок сбора отходов просроченных лекарственных средств. Сегодня введен в действие ТКП 17.11-08-2024 (33040/33140)<sup>19)</sup>. В республике определено, что отходы лекарственных средств, за исключением жидких лекарственных форм, подлежат обязательному сбору в аптеках площадью не менее 100 м<sup>2</sup>, больницах, поликлиниках, амбулаториях, путем установки специальных контейнеров для самостоятельного размещения отходов физическими лицами или путем передачи отходов уполномоченному работнику организаций. Вывоз осуществляется организа-

---

<sup>17)</sup>Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 2 сентября 2024 г. № 137/44 «О порядке обращения с медицинскими отходами».

<sup>18)</sup>ЦУР: Природа без фармацевтических отходов. 2024. URL: <https://sdgs.by/best-practices/inicziativa-priroda-bez-farmaczevticheskikh-othodov/> (дата обращения 20.02.2024).

<sup>19)</sup>Технические требования к обращению с коммунальными отходами Охрана окружающей среды и природопользование. 2024. Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Тэхнічныя патрабаванні да абыходжання з камунальнымі адходамі: ТПК 17.11-08-2024. Введен 16.09.2024. Минск. МЖКХ. 30 с.

цией, оказывающей услуги по обращению с коммунальными отходами или специализированной организацией по заявке.

Требование по развитию эффективной системы сбора отходов просроченных лекарственных средств в учреждениях, оказывающих медицинские услуги, нашло свое отражение в Национальном плане действий по развитию «зеленой» экономики Республики Беларусь на 2021-2025 годы<sup>20)</sup>.

Отдельным вопросом стоит утилизация в организациях здравоохранения радона, используемого в виде радоновых ванн, вод и источников для лучевой терапии вследствие его радиоактивности. Зачастую утилизация требует специальных условий и соблюдения санитарных норм<sup>21), 22)</sup>.

В Беларуси месторождение минеральных радоновых вод расположено вблизи деревни Боровики Дятловского района Гродненской области. В геоструктурном отношении район расположен в пределах Дятловской антиклинальной структуры, находящейся в центральной сводовой части Белорусского кристаллического массива. В 2015 году удельная активность колебалась от 16 до 56 нКи дм<sup>3-1</sup> (0.592 – 2.072 Бк г<sup>-1</sup>) (Коробейников, 2016), что превышает уровень освобождения для природных альфа-излучающих радионуклидов 0.05 Бк г<sup>-1</sup><sup>23)</sup> Наиболее простым методом уменьшения содержания радона в воде, использованной для радоновых ванн вне природных водоемов, будет его выведение из воды при умеренном нагреве.

В настоящее время в г. Минске на основании постановления Минского городского Совета депутатов<sup>24)</sup> создана централизованная система сбора отходов лекарственных средств у населения<sup>25)</sup>.

Для технической поддержки проекта в Республике Беларусь функционирует чат-бот «Кудыкінуць?» на базе мессенджера Telegram, в котором пользователям доступна информация о правилах раздельного сбора разных групп отходов, в том числе и лекарственных средств. Кроме инструкции с правилами сбора лекарственных препаратов с истекшим сроком годности в чат-боте можно узнать адреса ближайших пунктов сбора, указав свое местораспо-

---

<sup>20)</sup>Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 2 сентября 2024 г. № 137/44 «О порядке обращения с медицинскими отходами».

<sup>21)</sup>Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31.12.2013 № 137 Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения».

<sup>22)</sup>Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28.12.2012 № 213 Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности».

<sup>23)</sup>Постановление Совета Министров Республики Беларусь 25 января 2021 г. № 37 «Об утверждении гигиенических нормативов».

<sup>24)</sup>Постановление Минского городского Совета депутатов от 18 сентября 2020 года № 237 «Об обращении с отходами просроченных лекарственных средств».

<sup>25)</sup>Места сбора отходов просроченных лекарственных средств в г. Минске. URL: <https://minskpriroda.gov.by/sp/activities/ecology-ofminsk/mesta-sbora-otkhodov-prosrochennykhlekarstvennykh-sredstv-v-g-minske/> (дата обращения: 14.09.2025).

ложение. На рынке информационных услуг существуют мобильные приложения, оптимизирующие процесс контроля за «домашней» аптечкой. Например, «Аптечка. Учет медикаментов» – приложение для ведения учета лекарственных препаратов. При регистрации лекарственного препарата в приложении указывается дата истечения его срока годности, по достижении которой также поступает уведомление о том, что лекарственные средства больше нельзя принимать и его необходимо передать для обезвреживания<sup>26)</sup>.

Социологическое исследование, проведенное в 2023 году, в котором приняли участие 1285 жителей г. Минска, показало, что большинство респондентов (78.3%) утилизируют лекарственные препараты вместе с бытовыми отходами, 8.0% – путем слива в канализацию и лишь каждый десятый (10.0%) пользуется услугами специализированных пунктов сбора. При этом 31.0% респондентов уверены, что никакого вреда экологии фармацевтические отходы не приносят.

Вместе с тем за 2021 год в Республике Беларусь было собрано 854.4 кг лекарственных средств с истекшим сроком годности, за 2022 год – 1770 кг, за 2023 год – 2279.7 кг. Ежегодно количество пунктов сбора отходов лекарственных средств с истекшим сроком годности прибавляется, их численность на конец 2024 года составила 51 пункт<sup>25)</sup>. Результаты социологического опроса населения г. Минска указывают на низкую осведомленность в вопросах корректной утилизации лекарственных средств с истекшим сроком годности, что требует совершенствование информационной работы как с населением, так и с медицинскими и фармацевтическими работниками. С этой целью сотрудниками учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет» разработан информационный комплекс для населения, медицинских и фармацевтических работников о правилах обращения с лекарственными препаратами с истекшим сроком. Он способствует решению проблемы недостаточной информированности населения о вреде фармацевтических отходов для окружающей среды и в нем реализована база данных со сведениями о возможных экологических рисках лекарственных препаратов. Повышение уровня грамотности в вопросах обращения лекарственных препаратов с истекшим сроком годности позволит сократить вероятность их попадания в окружающую среду и минимизировать вред, наносимый окружающей среде фармполлютантами (Михайлова, Лукашов, 2024).

На фармацевтическом факультете учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет» с 2021 года функционирует волонтерский отряд «Экофарм», целью которого является разработка подходов к сбору и утилизации фармацевтических отходов, развитие экологической культуры студентов фармацевтического факультета и населения Республики Беларусь.

В условиях экологических проблем, таких как загрязнение и истощение ресурсов, экологические аспекты становятся критически важными при произ-

---

<sup>26)</sup> Аптечка. Учет медикаментов (2025) URL: <https://www.rustore.ru/catalog/app/ru.decsoft.myaidkit> (дата обращения: 14.09.2025).

---

водстве и использовании лекарств. В соответствии с этим особое значение приобретает обучение будущих фармацевтов экологическим принципам для минимизации негативных воздействий, рационального использования ресурсов и безопасной утилизации отходов. В современной фармацевтике от специалиста требуется не только знание свойств и способов применения лекарственных препаратов, но и глубокое осознание их влияния на экологическую систему. Обучение в области фармацевтической экологии способствует развитию экологической культуры, навыков рационального природопользования, правильного обращения с отходами и внедрения экологически безопасных технологий. Эти знания и умения позволяют будущим провизорам стать активными участниками экологической политики, внедрять стандарты устойчивого развития и участвовать в решении глобальных экологических проблем (Прокопенко, 2024; Федотенко, 2022; Федотенко, 2023).

Координацию межведомственного взаимодействия по вопросам экстренного реагирования и ликвидации медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций осуществляет государственное учреждение «Республиканский центр организации реагирования»<sup>27)</sup>, 28).

В военно-медицинских организациях обезвреживание и утилизация медицинских отходов также является важной проблемой (Исакова, 2006). Военные врачи осуществляют санитарный надзор и медицинский контроль за выполнением требований нормативных документов в области защиты здоровья военнослужащих и охраны окружающей среды, своевременно и качественно проводят медико-профилактический и иные защитные мероприятия.

Таким образом: соблюдение правил, нормативов, стандартов, обучение персонала эффективному управлению отходами лекарственных средств – составная часть безопасности жизнедеятельности; предотвращение негативного воздействия на окружающую среду и общественное здоровье.

### Список литературы

Баренбойм, Г.М., Чиганова, М.А. (2012) Загрязнение поверхностных и сточных вод лекарственными препаратами, *Вода: химия и экология*, № 10, с. 40-46.

Есипов, А.В., Абушинов, В.В. (2018) Проблемы организации внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности в медицинской организации, *Госпит. медиц.: наука и практика*, т. 1, № 4, с. 3-11.

Коробейников, Б.И. (2016) *Минеральные радоновые воды в Беларуси*, Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь. Электронная библиотека БГУ.

---

<sup>27)</sup> Национальная стратегия по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций на период 2019-2030 гг. URL: <https://ucp.by/images/file/fpnk/NS1930.pdf>. (дата обращения 22.01.2025).

<sup>28)</sup> Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 07.12.2021 г. № 124 «Об отраслевой подсистеме государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

---

Михайлова, Н.И., Лукашов, Р.И. (2024) Роль информационных приложений и нейросетей в системе обращения фармацевтических отходов, *Вестник фармации*, № 4 (106), с. 24-30, doi: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2024.4.24>.

Мухутдинова, А.Н., Рычкова, М.И., Тюмина, Е.А., Вихарева, Е.В. (2015) Фармацевтические соединения на основе азотсодержащих гетероциклов – новый класс загрязнителей окружающей среды, *Вестник Пермского Университета*, вып. 1, с. 65-76.

Петрухина, А.Н., Ларионов, Е.А., Ларионова В.М. (2023) Лекарственные препараты как потенциальные загрязнители водной среды, *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, vol. 12-3 (87), pp. 16-19.

Прожерина, Ю. (2017) Фармацевтические отходы как новая экологическая проблема, *Ремедиум*, № 11, с. 14-19.

Прокопенко, И.П. (2024) Компетентностный подход в обучении студентов дисциплины «Фармацевтическая экология», *Научный альманах*, № 11-4 (121), с. 26-29.

Романова, И.С., Гавриленко, Л.Н., Кожанова, И.Н., Чак, Т.А., Сачек, М.М., Мардас, Д.М. (2023) Проблемные вопросы фармакотерапии беременных женщин и детей: фармакоэпидемиологическое исследование, *Современные достижения и перспективы развития охраны здоровья населения, Сборник трудов Международной научно-практической конференции*, Ташкент, с.103-108.

Федотенко И.Л. (2022) Формирование профессиональной направленности будущих фармацевтов в условиях вуза: теоретический анализ, *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Педагогика*, № 1, с. 139-151.

Федотенко И.Л. (2023) Использование потенциала образовательного сообщества «Клуб фармацевтов» в процессе формирования профессиональной направленности студентов, *Азимут научных исследований: педагогика и психология*, т. 12, № 3(44), с. 102-107.

Экология (2006) *Военная экология*, под ред. В.И. Исакова, М., Смолена, 724 с.

Felicity, T. (2017) Фармацевтические отходы в окружающей среде: взгляд с позиций культуры, *Панорама общественного здравоохранения*, т. 3(1), с. 1-140.

*Essential services for quality care* (2025) Water, sanitation, hygiene, health care waste and electricity services in health care facilities: global progress report, Geneva, World Health Organization and the United Nations Children's Fund (UNICEF), Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

*STEPS: Распространенность факторов риска неинфекционных заболеваний в Республике Беларусь, 2020 г.* (2022) Копенгаген, Европейское региональное бюро ВОЗ, Лицензия: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

*The Sustainable Development Goals Report. United Nations* (2025) Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2025.pdf> (accessed August 18, 2025)

---

Wilkinson, J.L., Boxall, A.B.A., Marchant, R.A., et al. (2022) Pharmaceutical pollution of the world's rivers, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 119, no. 8, p. e2113947119, doi: 10.1073/pnas.2113947119.

## References

Barenboym, G.M., Chiganova, M.A. (2012) Zagryazneniye poverkhnostnykh i stochnykh vod lekarstvennymi preparatami [Pollution of surface and wastewater by pharmaceuticals], *Voda, khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology], no. 10, pp. 40-46.

Yesipov, A.V., Abushinov, V.V. (2018) Problemy organizatsii vnutrennego kontrolya kachestva i bezopasnosti meditsinskoj deyatel'nosti v meditsinskoj organizatsii [Problems of organizing internal quality control and safety of medical activities in a medical organization], *Gospit. medits., nauka i praktika*, vol. 1, no. 4, pp. 3-11.

Korobeynikov, B.I. (2016) *Mineral'nyye radonovyye vody v Belarusi* [Mineral radon waters in Belarus], Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi, Minsk, Belarus' [Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus], Electronic library of BSU.

Mikhaylova, N.I., Lukashov, R.I. (2024) Rol' informatsionnykh prilozheniy i neyrosetey v sisteme obrashcheniya farmatsevticheskikh otkhodov [The role of information applications and neural networks in the pharmaceutical waste management system], *Vestnik farmatsii*, no. 4 (106), pp. 24-30, doi: <https://doi.org/10.52540/2074-9457.2024.4>.

Mukhutdinova, A.N., Rychkova, M.I., Tyumina, Ye.A., Vikhareva, Ye.V. (2015) Farmatsevticheskiye soyedineniya na osnove azotsoderzhashchikh geterotsiklov – novyy klass zagryazniteley okruzhayushchey sredy [Pharmaceutical compounds based on nitrogen-containing heterocycles – a new class of environmental pollutants], *Vestnik Permskogo Universiteta* [Bulletin of Perm University], issue 1, pp. 65-76.

Petrukhina, A.N., Larionov, Ye.A., Larionova V.M. (2023) Lekarstvennyye preparaty kak potentsial'nyye zagryazniteli vodnoy sredy [Medicines as potential pollutants of the aquatic environment], *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, vol. 12-3 (87), pp. 16-19.

Prozherina, Yu. (2017) Farmatsevticheskiye otkhody kak novaya ekologicheskaya problema [Pharmaceutical Waste as an Emerging Environmental Problem], *Remedium*, no. 11, pp. 14-19.

Prokopenko, I.P. (2024) Kompetentnostnyy podkhod v obuchenii studentov distsipliny «Farmatsevticheskaya ekologiya» [A Competency-Based Approach to Teaching Students the Discipline "Pharmaceutical Ecology"], *Nauchnyy al'manakh* [Scientific Almanac], no. 11-4 (121), pp. 26-29.

Romanova, I.S., Gavrilenko, L.N., Kozhanova, I.N., Chak, T.A., Sachek, M.M., Mardas, D.M. (2023) Problemnyye voprosy farmakoterapii beremennykh zhenshchin i detey: farmakoepidemiologicheskoye issledovaniye [Problematic issues of pharmacotherapy of pregnant women and children: a pharmacoepidemiological study], *Sovremennyye dostizheniya i perspektivy razvitiya okhrany zdorov'ya naseleniya, Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern achievements and prospects for the development of public health, Collection of works of the International scientific and practical conference], Tashkent, pp. 103-108.

Fedotenko I.L. (2022) Formirovaniye professional'noy napravlenosti budushchikh farmatsevtov v usloviyakh vuza: teoreticheskiy analiz [Developing the Professional Focus of Future Pharmacists in a University Setting: A Theoretical Analysis], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Pedagogika*, no. 1, pp. 139-151.

Fedotenko I.L. (2023) Ispolzovaniye potentsiala obrazovatel'nogo soobshchestva «Klub farmatsevtov» v protsesse formirovaniya professional'noy napravlenosti studentov [Using the Potential of the Educational Community "Pharmacists' Club" in Developing Students' Professional Focus], *Azimet nauchnykh issledovaniy, pedagogika i psikhologiya*, vol. 12, no. 3(44), pp. 102-107.

Ekologiya [Ecology] (2006) *Voyennaya ekologiya* [Military Ecology], textbook, in V.I. Isakov, M. Smolen (eds.), 724 p.

Felicity, T. (2017) Pharmaceutical waste in the environment: a cultural perspective, *Public Health Panorama*, vol. 3(1), pp. 1-140.

*Essential services for quality care* (2025) Water, sanitation, hygiene, health care waste and electricity services in health care facilities: global progress report, Geneva, World Health Organization and the United Nations Children's Fund (UNICEF), Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

*STEPS: Prevalence of Noncommunicable Disease Risk Factors in the Republic of Belarus, 2020* (2022) Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

*The Sustainable Development Goals Report. United Nations* (2025) Available at: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2025.pdf> (accessed August 18, 2025).

Wilkinson, J.L., Boxall, A.B.A., Marchant, R.A., et al. (2022) Pharmaceutical pollution of the world's rivers, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 119, no. 8, p. e2113947119, doi: 10.1073/pnas.2113947119.

*Статья поступила в редакцию (Received): 18.11.2025.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.03.2026.*

**Для цитирования / For citation:**

Максимович, М.М., Прохоцкая, М.А., Шнитко, С.Н., Сачек, М.М., Терехович, Т.И. (2026) Утилизация и обезвреживание лекарственных средств как основа экологической безопасности в республике Беларусь, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 156-170, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-156-170.

Maksimovich, M.M., Prakhotskaya, M.A., Shnitko, S.N., Sachek, M.M., Tserakhovich, T.I. (2026) Disposal and neutralization of medicines as a basis for environmental safety in the republic of Belarus, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 156-170, doi: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-156-170.

## Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга атмосферного воздуха охраняемых природных районов Галапагос

*М.Л. Росеро Вальехо<sup>1)</sup>\*, О.А. Хлебосолова<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup> ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству»,  
Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 10/2

<sup>2)</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ),  
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

\*Адрес для переписки: [luurosv@gmail.com](mailto:luurosv@gmail.com)

**Реферат.** В статье представлены результаты оценки состояния атмосферного воздуха по данным дистанционного зондирования за 2001-2025 гг. в районах с высокой природной ценностью Республики Эквадор – в пределах Национального парка Галапагос (7995.4 км<sup>2</sup>) и Галапагосского морского заповедника (133000 км<sup>2</sup>). Используются спутниковые показатели аэрозольной оптической глубины (AOD) по данным MODIS, а также столбовые концентрации NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> по данным Sentinel-5P/TROPOMI. Обработка информации выполнена с применением платформы Google Earth Engine, построены карты распределения и временные ряды для выявления межгодовой изменчивости и аномальных эпизодов. Показано, что вариации аэрозольной нагрузки и газовых загрязнителей обусловлены совокупным воздействием вулканической активности, регионального переноса воздушных масс и антропогенных факторов, связанных с судоходством и туристической нагрузкой. Максимальные концентрации SO<sub>2</sub> приурочены к периодам активизации вулканов Фернандина и Исабела, а аномалии AOD и NO<sub>2</sub> отражают вклад природных и антропогенных источников. Полученные результаты обосновывают высокую информативность спутниковых данных для мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях отсутствия разветвлённой наземной сети наблюдений и подтверждают необходимость формирования единой системы экологического мониторинга в пределах охраняемых природных районов Галапагос.

**Ключевые слова.** Дистанционное зондирование, экологический мониторинг, качество атмосферного воздуха, аэрозольная оптическая глубина, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Национальный парк Галапагос, Галапагосский морской заповедник.

## Using remote sensing data for ecological air monitoring in Galapagos protected natural areas

---

*M.L. Rosero Vallejo.<sup>1)\*</sup>, O.A. Khlebosolova<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>State University of Land Use Planning,  
10/2 Kazakova St., 105064, Moscow, Russian Federation

<sup>2)</sup>Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI),  
23 Miklukho-Maklaya St., 117997, Moscow, Russian Federation

\*Correspondence address: *luurosv@gmail.com*

**Abstract.** This paper presents the results of an assessment of the state of atmospheric air based on remote sensing data for 2001-2025 in areas of high natural value in the Republic of Ecuador – within the Galapagos National Park (7995.4 km<sup>2</sup>) and the Galapagos Marine Reserve (133.000 km<sup>2</sup>). Aerosol optical depth (AOD) from MODIS and column amounts of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from Sentinel-5P/TROPOMI were analyzed. Data processing was carried out using the Google Earth Engine platform; spatial distribution maps and time series were generated to detect interannual variability and anomalous events. The results show that variations in aerosol loading and gaseous pollutants are driven by the combined effects of volcanic activity, regional atmospheric transport and anthropogenic factors related to shipping and tourism. Maximum SO<sub>2</sub> concentrations are associated with periods of increased activity of Fernandina and Isabela volcanoes, while AOD and NO<sub>2</sub> anomalies reflect contributions from both natural and anthropogenic sources. The findings demonstrate the high value of satellite observations for air-quality monitoring under conditions of a sparse ground-based network and support the need to develop a unified environmental monitoring system within the Galapagos protected natural areas.

**Keywords.** Remote sensing, environmental monitoring, air quality, aerosol optical depth, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Galapagos National Park, Galapagos Marine Reserve.

## Введение

Современные подходы к организации экологического мониторинга на охраняемых природных территориях мира предусматривают привлечение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) дополнительно к данным наземных исследований. Использование космических снимков позволяет: (1) наблюдать и сравнивать состояние природных и природно-хозяйственных систем на значительных территориях в режиме реального времени с минимальными финансовыми вложениями, (2) оценивать динамику компонентов природной среды на основе многолетних рядов данных, (3) создавать карты и прогнозные модели с постоянно пополняющейся базой пространственных данных, (4) выявлять развитие неблагоприятных процессов на ранних стадиях, (5) осуществлять управление охраняемыми природными территориями с учетом уникальных особенностей каждого региона.

Анализ международных и национальных документов, а также последних научных публикаций указывает на недостаточное использование данных ДЗЗ для экологического мониторинга на охраняемых природных территориях

(Стишов, Троицкая, 2025). Например, в методических рекомендациях «Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях», выпущенных в России в 2025 году Фондом охраны природы и сохранения редких видов животных «Природа и люди», предусмотрено привлечение данных ДЗЗ только по 6 пунктам из 153. Так во втором разделе Типовой программы экологического мониторинга на федеральных ООПТ «Ландшафты и растительный покров» проведение дистанционных наблюдений предлагается проводить для изучения контуров геоморфологических структур, структурных элементов растительного покрова, первичной продуктивности. В пятом разделе программы «Абиотические объекты и процессы» предусмотрены дистанционные наблюдения за контурами и площадью ледников, фирновых полей, соотношением типов льда в разные периоды в пределах крупных озер и морской акватории, конфигурацией береговой линии, площадью островов, озер, динамикой пойм рек. Вместе с тем, изучение экологического состояния атмосферного воздуха и водных объектов с привлечением данных ДЗЗ не рекомендовано, хотя они крайне важны для анализа многолетней динамики и понимания изменений, происходящих в видовом, экосистемном и ландшафтном разнообразии охраняемых природных территорий (Стишов, Троицкая, 2025).

Целью нашего исследования стало использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга и выявления многолетних изменений объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО в Республике Эквадор – Национального парка Галапагос (7995,4 км<sup>2</sup>) и Галапагосского морского заповедника (133 000 км<sup>2</sup>) (Constitución de la República del Ecuador, 2008; Ley Orgánica de Régimen Especial para la Provincia de Galápagos, 2015; Galápagos Marine Reserve, 2025).

Исследование проводилось в 2022-2025 гг. и предусматривает создание электронной базы данных (серий космических снимков) за текущее столетие и расчет коэффициентов, таких как AOD (показатель аэрозольной нагрузки атмосферы), NDVI (интегральный показатель состояния растительности), NDTI (спектральный индикатор мутности/взвешенных частиц в поверхностном слое воды). Результаты исследования рассматриваются с позиции долгосрочных изменений и интерпретируются в отношении влияния природных и антропогенных факторов, характера и степени воздействия конкретных источников (Росеро Вальехо, Хлебосолова, 2024; Росеро, Хлебосолова, 2022).

В данном сообщении представлены результаты изучения многолетней динамики по одному компоненту – атмосферному воздуху, представлена оценка пространственно-временной динамики показателей качества атмосферного воздуха за период 2001-2025 гг.

Выбор охраняемых природных районов Галапагос обусловлен их особой значимостью и актуальностью исследований с применением данных ДЗЗ, поскольку наземные измерения состояния атмосферного воздуха с момента их организации специально не проводились. Для национального парка и морского заповедника применение данных ДЗЗ имеет ключевое значение, поскольку это единственный пространственно репрезентативный источник

информации, что обусловлено отсутствием разветвленной постоянно действующей сети наземных мониторинговых пунктов, проблемами сбора стандартизированных данных, логистическими сложностями доступа и обслуживания удалённых участков, недостаточным финансированием и координацией действующих научных программ (Cazorla, Herrera, 2020; Charles Darwin Foundation, 2025).

Изучение имеющихся литературных источников, раскрывающих различные аспекты состояния атмосферного воздуха по тропическим акваториям и вулканически активным островным системам, указывает на высокую эффективность спутниковых наблюдений для оценки аэрозольной нагрузки и газовых примесей в атмосфере (Carn, 2017; Cazorla, Herrera, 2020; Kahl et al., 2015). В ряде исследований, посвящённых архипелагу Галапагос, продемонстрирована возможность выявления вулканических выбросов и регионального переноса аэрозолей, а также загрязняющих газов с использованием данных MODIS, OMI, TROPOMI (Carn, 2017; Kahl et al., 2015; NASA Aura/OMI, 2008). В нашей работе все имеющиеся источники информации впервые объединены для наземных и морских районов ввиду их географического положения и тесной взаимосвязи в отношении развития физико-географических процессов.

## **Методы и материалы исследования**

Практическая реализация поставленной цели предусматривает оценку качества атмосферного воздуха в пределах охраняемых природных районов Галапагос, куда входит 97% площади островов и 40-мильная морская зона вокруг них (Acuerdo МААТЕ-МААТЕ-2025-0044-А, 2025; Galápagos Marine Reserve, 2025). В ходе исследования был проведен поиск и анализ материалов из открытых источников информации, построены графики многолетних изменений, выявлено влияние природных факторов (вулканическая деятельность, глобальные климатические процессы, колебания Эль-Ниньо и Ла-Нинья) и антропогенных воздействий (Garreaud, 2021).

Использованы данные из различных источников за период 2001-2025 гг.: данные MODIS (спутники Terra/Aqua) для анализа аэрозольной оптической глубины (AOD) над архипелагом, применяемые в качестве индикатора суммарной аэрозольной нагрузки в атмосфере и косвенного показателя уровня загрязнения воздуха; данные Sentinel-5P/TROPOMI для изучения столбовых концентраций  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , позволяющие детализировать источники загрязнения, включая судоходство, туристическую активность и локальные антропогенные выбросы, а также отслеживать характерные для региона вулканические выбросы (Copernicus Sentinel-5P, 2025; NASA Aura/OMI, 2008); данные Landsat и Sentinel-2. Однако в этом сообщении подробно рассматриваются результаты, полученные для показателей атмосферного воздуха (AOD,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ).

Обработка данных выполнялась в геоинформационной облачной среде Google Earth Engine. Для каждого продуктового набора (MODIS AOD,

Sentinel-5P  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) осуществлялись: фильтрация по качественным флагам и облачности с целью исключения некорректных измерений и пикселей с низким качеством; пространственное усреднение по полигонам охраняемых природных территорий архипелага (наземная часть Национального парка Галапагос и прилегающие участки морской резервной зоны); формирование временных рядов (месячных и годовых композитов) для периода 2001-2025 гг. (AOD) и 2018-2025 гг. ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ); расчёт статистических характеристик (среднее, медиана, стандартное отклонение) и аномалий относительно многолетнего среднего уровня.

Аномальные эпизоды определялись как отклонения, превышающие фоновые значения более чем на одну-две величины стандартного отклонения для соответствующего месяца или сезона. Для интерпретации выявленных аномалий использовались сведения о вулканической активности в регионе (извержения вулканов Вулф, Ла-Кумбре и др.), данные о лесных пожарах в Южном полушарии, а также информация о фазах Эль-Ниньо и Ла-Нинья, особенностях циркуляции атмосферы в Южно-Тихоокеанском регионе (Kahl et al., 2015; Jaffe et al., 2021; Garreaud, 2021).

Отдельное внимание уделялось возможным искажениям спутниковых оценок, что обусловлено: влиянием морских аэрозолей и высокой влажности воздуха в прибрежной зоне, что может приводить к завышенным значениям AOD; высокой вулканической активностью, которая способна маскировать антропогенные источники  $\text{SO}_2$ ; особенностями пространственного разрешения и смешения сигналов над сложной береговой линией. Для минимизации этих эффектов анализ проводился с учётом сезонных климатических условий и известной хронологии вулканических событий за исследуемый период. В целом такой подход позволяет обеспечить целостное понимание динамики атмосферных процессов в условиях ограниченной наземной наблюдательной сети и выявлять долгосрочные тенденции (2001-2025 гг.) и кратковременные аномальные эпизоды с высокой детализацией (Cazorla, Herrera, 2020; Copernicus Sentinel-5P, 2025).

## Результаты и анализ

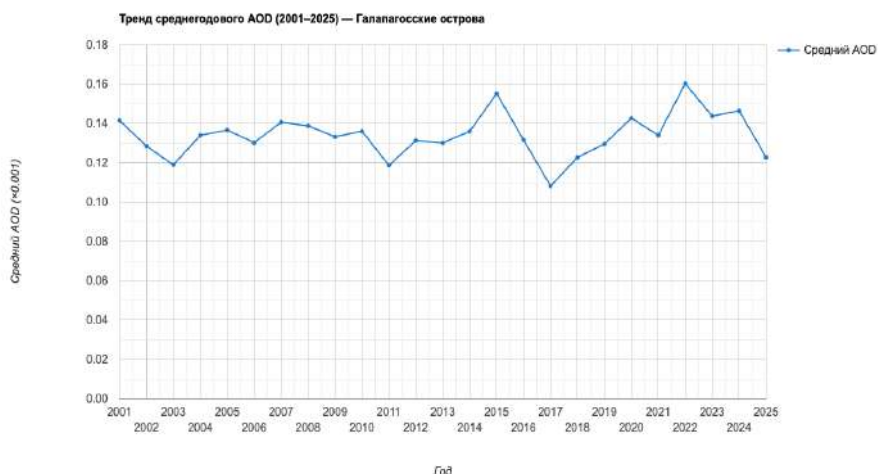
Комплексная оценка состояния атмосферного воздуха в пределах охраняемых природных районов Галапагос за период 2001-2025 гг. включает анализ пространственно-временной динамики аэрозольной нагрузки (AOD) и концентраций газовых загрязнителей ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ).

### 1. Межгодовая динамика аэрозольной оптической глубины (AOD)

Анализ временных рядов AOD по данным MODIS за период 2001-2025 гг. показывает выраженные положительные аномалии в отдельные годы, в частности в 2015 и 2021 гг. (рис. 1).

Детальное исследование показало, что пиковые значения AOD обусловлены совокупностью процессов различного происхождения. В 2015 г. ключевым фактором стало извержение вулкана Вулф на острове Исабела, произошедшее в мае и сопровождавшееся значительным выбросом пепла и газов в

тропосфере (Kahl et al., 2015). Это привело к локальному увеличению концентрации аэрозолей над архипелагом. Дополнительный вклад могли вносить межконтинентальные потоки Сахаро-Сахельской минеральной пыли, сформированные под влиянием усиления африканского восточного струйного течения и субтропического антициклона Северной Атлантики, что способствовало переносу аэрозольных масс в восточную часть Тихого океана, включая рассматриваемый район (Gimeno et al., 2016).



**Рисунок 1.** Межгодовая динамика аэрозольной нагрузки в атмосфере Галапагосских островов по данным MODIS за период 2001-2025 гг.

**Figure 1.** Interannual dynamics of aerosol loading in the atmosphere of the Galapagos Islands based on MODIS data for 2001-2025

Важную роль имеет стратосферная составляющая: извержение чилийского вулкана Кальбуко в апреле 2015 г. сопровождалось инъекцией сульфатных аэрозолей на высоты  $\geq 15$  км, а их дисперсия в течение нескольких месяцев через меридиональные стратосферные потоки способствовала повышению фоновой AOD в экваториальной зоне Южного полушария (Textor, 2006; Zhang, 2020).

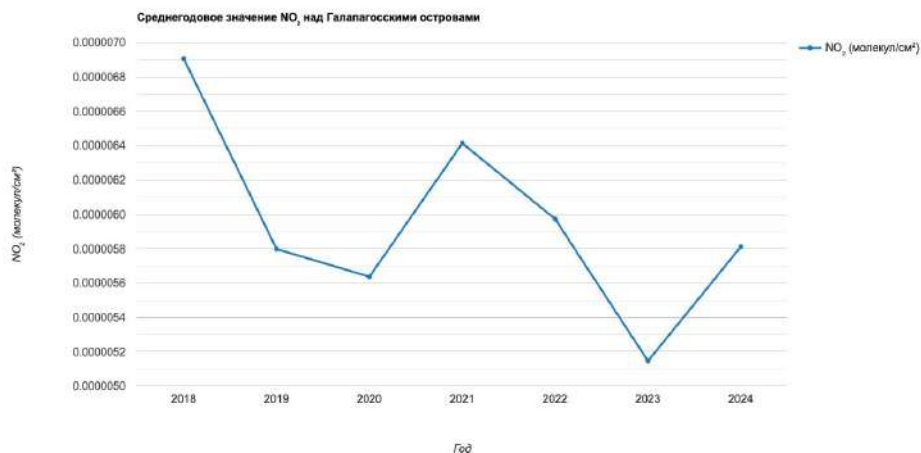
Пик AOD в 2021 г. в большей степени связан с пирогенными аэрозолями, образовавшимися в результате масштабных лесных пожаров в Австралии в 2019-2020 гг. Высокие концентрации аэрозолей проникли в стратосферу посредством пирокумулятивных процессов и сохранялись на повышенных уровнях в Южном полушарии вплоть до середины 2021 г., что способствовало увеличению фоновой оптической толщины атмосферы над изучаемым районом (Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Дополнительный вклад могли вносить адвекция органо-углеродных аэрозолей из тропических и субтропических регионов Южной Америки (González et al., 2016).

Таким образом, зафиксированные аномалии AOD в 2015 и 2021 гг. отражают синтез локальных вулканогенных выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и длительного присутствия пирогенных аэрозолей в стратосфере, демонстрируя доминирующую роль региональных и

глобальных источников аэрозольного вещества в формировании оптических характеристик атмосферы экваториальной зоны Тихого океана в пределах охраняемых природных районов Галапагос.

## 2. Межгодовая динамика тропосферного диоксида азота ( $\text{NO}_2$ )

Анализ временных рядов тропосферного  $\text{NO}_2$  по данным Sentinel-5P/TROPOMI за период 2018-2024 гг. показал наличие положительных аномалий концентраций в 2018 и 2021 гг. (рис. 2).



**Рисунок 2.** Межгодовая динамика концентрации тропосферного  $\text{NO}_2$  над архипелагом Галапагос по данным Sentinel-5P за период 2018-2024 гг.

**Figure 2.** Interannual dynamics of tropospheric  $\text{NO}_2$  concentration over the Galapagos Archipelago based on Sentinel-5P data for 2018-2024.

С учётом низкой степени индустриализации и небольшой плотности населения провинции полученные пиковые значения не могут быть объяснены исключительно локальными антропогенными источниками, что свидетельствует о сложном взаимодействии процессов на локальном, региональном и глобальном уровнях.

Повышение концентрации  $\text{NO}_2$  в 2018 г., вероятно, связано с увеличением туристской активности, сопровождающейся ростом использования транспортных средств и сжиганием ископаемого топлива, а также с определёнными метеорологическими условиями (снижением уровня осадков, изменениями в циркуляции атмосферных масс), способствовавшими накоплению загрязнителей в приземном слое (Cazorla, Herrera, 2020; Wolfe et al., 2017). Существенную роль имеет межрегиональный перенос загрязняющих веществ с континентальных территорий побережья Южной Америки, особенно из урбанизированных и промышленных зон Эквадора и Перу под влиянием Южно-Тихоокеанского антициклона и восточных пассатов (González et al., 2016; Garreaud, 2021).

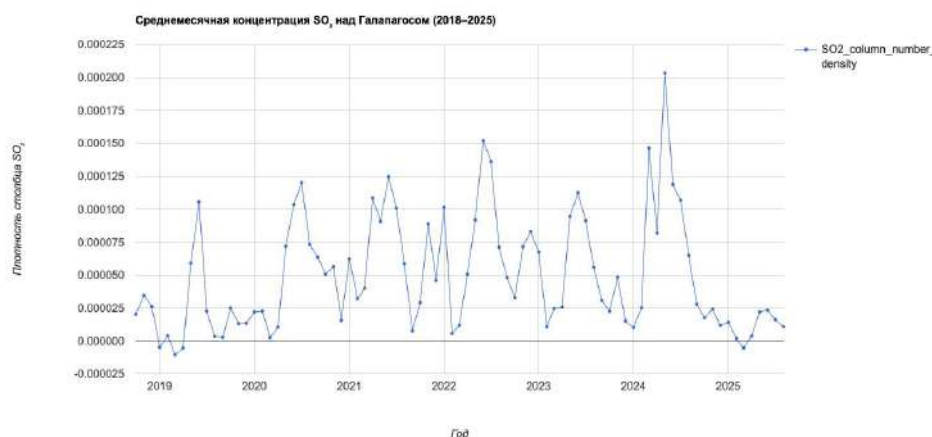
Пик концентраций  $\text{NO}_2$  в 2021 г. обусловлен сочетанием нескольких факторов глобального масштаба. Масштабные лесные пожары в Австралии и Амазонии 2019-2020 гг. привели к выбросу значительных масс пирогенных

аэрозолей и газов, которые с помощью пирокумулятивных процессов частично проникли в стратосферу, изменяя химический состав тропосферы в Южном полушарии (Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Дополнительно циркуляционные аномалии, связанные с переходной фазой между явлениями Ла-Нинья и Эль-Ниньо в 2020-2021 гг., могли способствовать усилению адвекции загрязнённого воздуха и химических предшественников  $\text{NO}_2$  из различных регионов (Garreaud, 2021).

Аналогичные закономерности выявлены в исследованиях AOD: отмеченные аномалии в 2015 и 2021 гг. объясняются совокупностью вулканогенных выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и долговременного присутствия пирогенных аэрозолей. Наблюдаемые аномалии  $\text{NO}_2$  в 2018 и 2021 гг. подчёркивают необходимость комплексного междисциплинарного подхода к пониманию экологического состояния атмосферы в удалённых и чувствительных экосистемах экваториальной части Тихого океана.

### 3. Межгодовая динамика тропосферного диоксида серы ( $\text{SO}_2$ )

Анализ временных рядов тропосферного  $\text{SO}_2$  по данным Sentinel-5P за период 2018-2025 гг. выявил два выраженных пика концентраций – в июне 2022 г. и в мае 2024 г. (рис. 3).



**Рисунок 3.** Межгодовая динамика концентрации тропосферного  $\text{SO}_2$  над архипелагом Галапагос по данным Sentinel-5P за период 2018-2025 гг.

**Figure 3.** Interannual dynamics of tropospheric  $\text{SO}_2$  concentration over the Galapagos Archipelago based on Sentinel-5P data for 2018-2025

Отмеченные аномалии тесно связаны с вулканической активностью крупнейших действующих вулканов архипелага – Фернандина и Исабела. Вулканические выбросы  $\text{SO}_2$  являются доминирующим источником загрязнения в регионе, формируя природный фон, который существенно варьирует в зависимости от интенсивности извержений и фаз дегазации (Carn, 2017; Kahl et al., 2015).

Населенные пункты, расположенные в непосредственной близости с охраняемыми районами Галапагос, характеризуются незначительной численностью и плотностью населения и отсутствием промышленного производ-

ства, однако нельзя полностью исключать вклад человека в эмиссию  $\text{SO}_2$ . Рост туристической активности (особенно в сезон пиковой посещаемости) сопровождается увеличением судоходства и авиационного трафика, что ведёт к дополнительным выбросам  $\text{SO}_2$  и других загрязнителей (Cazorla, Herrera, 2020; Wolfe et al., 2017). По своим масштабам они существенно уступают вулканическим, но могут оказывать влияние на базовые уровни загрязнения и вносить дополнительную вариабельность в периоды относительного снижения вулканической активности.

Пики концентраций  $\text{SO}_2$  в июне 2022 и мае 2024 гг., вероятно, связаны с мощными извержениями или периодами активной дегазации магматических газов, сопровождающимися образованием крупных масс вулканических аэрозолей (Carn, 2017; NASA Aura/OMI, 2008). Эти процессы не только повышают локальные концентрации  $\text{SO}_2$ , но и способствуют переносу загрязнителей на значительные расстояния под воздействием ветровых потоков, влияя на качество воздуха. Метеорологические условия в эти месяцы (снижение осадков, изменения направления пассатов) могли способствовать накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, усиливая эффект пиковых концентраций.

Значительное влияние на вариабельность  $\text{SO}_2$  оказывает региональный перенос загрязняющих веществ, связанный с циркуляцией воздушных масс под воздействием южнотихоокеанского антициклона и восточных пассатов (González et al., 2016). Глобальные климатические явления (Эль-Ниньо, Ла-Нинья) также косвенно влияют на распределение  $\text{SO}_2$  через изменение погодных условий и структуры циркуляции (Garreaud, 2021).

В совокупности полученные данные подчёркивают сложный характер атмосферного загрязнения диоксидом серы в пределах охраняемых природных районов Галапагос, где природные вулканические источники взаимодействуют с метеорологическими, климатическими и, в меньшей степени, антропогенными факторами. Для всестороннего понимания и точного прогнозирования влияния выбросов необходимы междисциплинарные исследования, включающие атмосферное моделирование и сопоставление с другими показателями (AOD,  $\text{NO}_2$  и др.).

## Обсуждение

Полученные результаты имеют непосредственное отношение к задачам экологического мониторинга в пределах охраняемых природных районов Галапагос. Выявленные аномалии концентраций  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и AOD отражают состояние атмосферной среды, от которого напрямую зависят устойчивость экосистем, существование эндемичных видов и в целом функционирование природных сообществ.

Повышенные уровни  $\text{SO}_2$  в периоды вулканической активности оказывают негативное воздействие на растительность, вызывая химический стресс и нарушая физиологические процессы у чувствительных видов, а также влияя на качество прибрежных вод при осаждении сульфатных аэрозолей (Carn,

2017; Textor, 2006). Увеличение аэрозольной нагрузки может снижать прозрачность атмосферы и уровень солнечной радиации, что влияет на фотосинтетическую активность и продуктивность наземных экосистем (Textor, 2006).

Присутствие  $\text{NO}_2$  в атмосфере, связанное с природными и антропогенными источниками, создаёт риск образования вторичных загрязнителей, включая тропосферный озон и нитратные аэрозоли, способных воздействовать на биоту и качество среды обитания. В условиях изолированных островных систем с высокой долей эндемичных видов такие факторы приобретают особую значимость.

Результаты исследования подтверждают, что спутниковые данные являются эффективным инструментом для мониторинга качества атмосферного воздуха в регионах с ограниченной наземной сетью наблюдений (Cazorla, Herrera, 2020; Copernicus Sentinel-5P, 2025). Они позволяют выявлять периоды повышенного риска, оценивать относительный вклад природных и антропогенных факторов и формировать основу для принятия решений в области природоохранной политики и управления туризмом и рекреацией на охраняемых природных территориях. Вместе с тем, важно учитывать ограничения спутниковых данных, связанные с пространственным разрешением снимков, влиянием облачности, морских аэрозолей и влажности. Для повышения надёжности интерпретации целесообразно комбинировать спутниковые наблюдения с доступными данными наземных измерений и результатами атмосферного моделирования – для охраняемых природных районов Галапагос это аналогичные участки в прибрежно-материковой части Эквадора (Cazorla, Herrera, 2020; Secretaría de Ambiente de Quito, 2025).

## Заключение

На основе данных MODIS и Sentinel-5P за период 2001-2025 гг. выполнена оценка динамики показателей состояния атмосферного воздуха в пределах охраняемых территорий Национального парка Галапагос и Галапагосского морского заповедника. Установлена выраженная межгодовая изменчивость аэрозольной оптической глубины (AOD) и концентраций газовых примесей ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) над архипелагом, отражающая сочетанное влияние глобальных, региональных и локальных факторов. Показано, что максимальные значения  $\text{SO}_2$  приурочены к периодам активной вулканической деятельности вулканов Фернандина и Исабела, что подтверждает доминирующую роль природного вулканического источника в формировании фона диоксида серы (Carn, 2017; Kahl et al., 2015). Выявленные аномалии AOD в отдельные годы обусловлены совокупностью вулканических выбросов, межконтинентального переноса минеральной пыли и пирогенных аэрозолей от крупных лесных пожаров в Южном полушарии (Gimeno et al., 2016; Jaffe et al., 2021; Kalashnikova et al., 2022). Вариации  $\text{NO}_2$  отражают смешанную природу источников и формируются под влиянием регионального переноса загрязнителей, локальной антропогенной нагрузки, связанной с транспортом и туризмом, а также глобальных циркуляционных и климатических процессов

(Cazorla, Herrera, 2020; González et al., 2016; Wolfe et al., 2017). Результаты исследования подтверждают высокую информативность спутниковых данных для оценки качества атмосферного воздуха в условиях отсутствия разветвлённой наземной сети наблюдений и демонстрируют возможность использования дистанционного зондирования в качестве базового инструмента экологического мониторинга. Полученные выводы обосновывают необходимость включения данных дистанционного зондирования для изучения состояния атмосферного воздуха в число приоритетных направлений экологического мониторинга, программ управления природоохранной, научной и туристско-рекреационной деятельностью охраняемых природных районов Галапагос и в широкой мировой практике.

### Список литературы

Росеро Вальехо, М.Л., Хлебосолова, О.А. (2024) История природопользования и перспективы совершенствования системы экологического мониторинга на Галапагосских островах (Республика Эквадор), *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, т. 66, № 2, с. 141-149, doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149.

Росеро, М., Хлебосолова, О.А. (2022) .*Система охраняемых природных районов Эквадора и перспективы её устойчивого развития на примере Галапагосских островов, Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий*, т. 9, Сборник статей IX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (6-8 октября 2022, Сочи), Сочи, ГКУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», Донской издательский центр, с. 347-354.

СТИШОВ, М.С., ТРОИЦКАЯ, Н.И. (2025) *Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях*, Методические рекомендации, 140 с.

Acuerdo MAATE-MAATE-2025-0044-A (2025) *Descripción de límites y zona de la Reserva de Recursos Marinos – 4 millas nauticas*, URL: <https://ambiente.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

Constitución de la República del Ecuador (2008) art. 258. *Creación del régimen de administración especial para la provincia de Galapagos*, URL: <https://en.unesco.org> (fecha de consulta: 14.08.2025).

Carn, S.A. (2017) Satellite-based monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 344, pp. 117-131.

Cazorla, M., Herrera, E. (2020) Air quality in the Galapagos Islands: A baseline view from remote sensing and in situ measurements, *Meteorological Applications*, vol. 27, e1878, doi: 10.1002/met.1878. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com> (дата обращения: 14.08.2025).

Charles Darwin Foundation (2025) *Science Plan, programas de monitoreo (long-term monitoring, subtidal and vegetation monitoring)*. URL: <https://www.darwinfoundation.org> (дата обращения: 14.08.2025).

Copernicus Sentinel-5P (2025) *Level-2 Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) product description*, URL: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 12.08.2025).

Galápagos Marine Reserve (2025) *Datos sobre rea protegida (≈133 km<sup>2</sup> / ≈51 000 ha)*. URL: <https://education.nationalgeographic.org> (дата обращения: 14.08.2025).

Garreaud, R. (2021) Influence of El Nio and La Nia on atmospheric circulation and air quality in the Pacific region, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 4, pp. 321-335, doi: 10.1007/s00382-021-05678.

Gimeno, B., Kalashnikova, O., Laurent, P. (2016) Intercontinental transport of mineral dust and aerosols: observations and modeling, *Atmospheric Science and Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 432-447.

González, P., Sánchez, V., Martnez H. (2016) Transporte interregional de contaminantes en Sudamérica: impacto en ecosistemas costeros, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, no. 12, pp. 7890-7908, doi: 10.5194/acp-16-7890-2016.

Jaffe, D., Smith, R., Chen, A. (2021) Impact of large wildfires on tropospheric air composition in the Southern Hemisphere, *International Journal of Atmospheric Research*, vol. 82, no. 1, pp. 101-119, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105.

Kahl, J.D.W., et al. (2015) Volcanic gas emissions at Galápagos volcanoes. Temporal and spatial patterns, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 1981–1989.

Kalashnikova, O., Hendrix, M., Li, S. (2022) Pyrogenic aerosols in the stratosphere: sources, transport and atmospheric impact, *Journal of Atmospheric Chemistry*. vol. 94, no. 3, pp. 275-298, DOI: 10.1007/s10874-022-09422-x.

*Ley Orgánica de Régimen Especial para la Provincia de Galápagos (LOREG)*(2015) Texto oficial, URL: <https://gobiernogalapagos.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

NASA Aura/OMI (2008) *OMSO2 – Sulphur Dioxide Product README and updates*, URL: <https://so2.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 11.08.2025).

Secretaría de Ambiente de Quito (2025) *REMMAQ – Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, official portal*, URL: <https://ambiente.quito.gob.ec> (дата обращения: 14.08.2025).

Textor, C. (2006) Impact of volcanic aerosols on climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, pp. 2707-2735.

Wolfe, T., García M., Rodríguez, L. (2017) Влияние туризма на атмосферное загрязнение в экологически чувствительных регионах, *Journal of Environmental Research*, vol. 45, no. 3, pp. 256-270.

---

Zhang, Q. (2020) Aerosol Optical Depth variations related to volcanic activity in tropical regions, *Atmospheric Environment*, vol. 234, Article 117551.

## References

Rosero Vallejo, M.L., Khlebosolova, O.A. (2024) Istoriya prirodopolzovaniya i perspektivy sovershenstvovaniya sistemy ekologicheskogo monitoringa na Galapagosskikh ostrovakh (Respublika Ekvador) [History of natural resource use and prospects for improving the environmental monitoring system in the Galapagos Islands (Republic of Ecuador)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, vol. 66, no. 2, pp. 141-149, doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149. [in Russian].

Rosero M., Khlebosolova O.A. (2022) *Sistema okhranyaemykh prirodnnykh rayonov Ekvadora i perspektivy ee ustoichivogo razvitiya na primere Galapagosskikh ostrovov* [System of protected natural areas of Ecuador and prospects for sustainable development: the case of the Galapagos Islands]. *Ustoichivoe razvitie osobo okhranyaemykh prirodnnykh territorii*. Vol. 9: Collection of papers of the IX All-Russian (National) Scientific and Practical Conference (October 6-8, 2022, Sochi). Sochi: GКУ КК «Prirodnyi ornitologicheskii park v Imeretinskoi nizmennosti», Donskoi izdatelskii tsentr, pp. 347-354. [in Russian].

Stishov, M.S., Troitskaya, N.I. (2025) *Organizatsiya ekologicheskogo monitoringa na osobo okhranyaemykh prirodnnykh territoriyakh. Metodicheskie rekomendatsii* [Organization of environmental monitoring in specially protected natural areas. Methodological recommendations], Moscow, 140 p. [in Russian].

Acuerdo MAATE-MAATE-2025-0044-A (2025) *Description of boundaries and the Marine Resources Reserve zone – 4 nautical miles*, URL: <https://ambiente.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

Constitucion de la Republica del Ecuador (2008) Art. 258. *Creation of the special administrative regime for the province of Galapagos*, URL: <https://en.unesco.org> (accessed: 14.08.2025).

Carn, S.A. (2017) Satellite-based monitoring of volcanic sulfur dioxide emissions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 344, pp. 117-131.

Cazorla, M., Herrera, E. (2020) Air quality in the Galapagos Islands: A baseline view from remote sensing and in situ measurements, *Meteorological Applications*, vol. 27, e1878, doi: 10.1002/met.1878. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com> (accessed: 14.08.2025).

Charles Darwin Foundation (2025) *Science Plan, monitoring programs (long-term monitoring, subtidal and vegetation monitoring)*. URL: <https://www.darwinfoundation.org> (accessed: 14.08.2025).

Copernicus Sentinel-5P (2025) *Level-2 Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) product description*, URL: <https://sentinel.esa.int> (accessed: 12.08.2025).

Galapagos Marine Reserve (2025) *Protected area data* ( $\approx 133\,000\text{ km}^2 / \approx 51\,000\text{ sq mi}$ ). URL: <https://education.nationalgeographic.org> (accessed: 14.08.2025).

Garreaud, R. (2021) Influence of El Niño and La Niña on atmospheric circulation and air quality in the Pacific region, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 4, pp. 321-335, doi: 10.1007/s00382-021-05678.

Gimeno, B., Kalashnikova, O., Laurent, P. (2016) Intercontinental transport of mineral dust and aerosols: observations and modeling, *Atmospheric Science and Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 432-447.

González, P., Sánchez, V., Martínez H. (2016) Transporte interregional de contaminantes en Sudamérica: impacto en ecosistemas costeros, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, no. 12, pp. 7890–7908, doi: 10.5194/acp-16-7890-2016.

Jaffe, D., Smith, R., Chen, A. (2021) Impact of large wildfires on tropospheric air composition in the Southern Hemisphere, *International Journal of Atmospheric Research*, vol. 82, no. 1, pp. 101-119, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105.

Kahl, J.D.W., et al. (2015) Volcanic gas emissions at Galápagos volcanoes. Temporal and spatial patterns, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 1981-1989.

Kalashnikova, O., Hendrix, M., Li, S. (2022) Pyrogenic aerosols in the stratosphere: sources, transport and atmospheric impact, *Journal of Atmospheric Chemistry*. vol. 94, no. 3, pp. 275-298, doi: 10.1007/s10874-022-09422-x.

*Ley Organica de Regimen Especial para la Provincia de Galapagos* (LOREG) (2015) Official text, URL: <https://gobiernogalapagos.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

NASA Aura/OMI (2008) *OMSO2 – Sulphur Dioxide Product README and updates*, URL: <https://so2.gsfc.nasa.gov> (accessed: 11.08.2025).

Secretaria de Ambiente de Quito (2025) *REMMAQ – Metropolitan Atmospheric Monitoring Network of Quito, official portal*, URL: <https://ambiente.quito.gob.ec> (accessed: 14.08.2025).

Textor, C. (2006) Impact of volcanic aerosols on climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 6, pp. 2707-2735.

Wolfe, T., Garcia, M., Rodriguez, L. (2017) Vliyanie turizma na atmosfernoe zagryaznenie v ekologicheski chuvstvitelnykh regionakh [Impact of tourism on atmospheric pollution in ecologically sensitive regions], *Journal of Environmental Research*, vol. 45, no. 3, pp. 256-270. [in Russian].

Zhang, Q. (2020) Aerosol Optical Depth variations related to volcanic activity in tropical regions, *Atmospheric Environment*, vol. 234, Article 117551.

---

Статья поступила в редакцию (Received): 29.09.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 22.04.2026.

---

**Для цитирования / For citation:**

Росеро Вальехо, М.Л., Хлебосолова, О.А. (2026) Использование данных дистанционного зондирования для экологического мониторинга атмосферного воздуха охраняемых природных районов Галапагос, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 171-185, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-171-185.

Rosero Vallejo, M.L., Khlebosolova, O.A. (2026) Using remote sensing data for ecological air monitoring in Galapagos protected natural areas, *Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 171-185, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-171-185.