

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Худякова Е.В., Ступин О.Г., Степанцевич М.Н., Кукарцев В.В. Экологический мониторинг территорий ликвидированных шахт Арктической зоны России // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.74422 EDN: FFEBLE URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74422

Экологический мониторинг территорий ликвидированных шахт Арктической зоны России

Худякова Елена Викторовна

доктор экономических наук

профессор; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, Россия, г. Москва, Тимирязевский р-н, ул. Тимирязевская, д. 49

✉ evhudyakova@rgau-msha.ru**Ступин Олег Геннадьевич**

магистр; кафедра цифровых технологий управления; Сибирский федеральный университет

660041, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, Октябрьский р-н, Свободный пр-кт, д. 79

✉ ipdme@mail.ru**Степанцевич Марина Николаевна**

кандидат экономических наук

доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

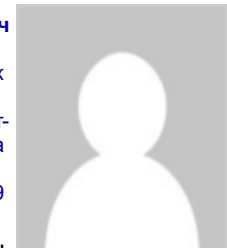
127434, Россия, г. Москва, Тимирязевский р-н, ул. Тимирязевская, д. 49

✉ stepancevich@rgau-msha.ru**Кукарцев Владислав Викторович**

кандидат технических наук

доцент; кафедра Прикладной информатики; Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева

127434, Россия, г. Москва, Тимирязевский р-н, ул. Тимирязевская, д. 49

✉ vlad_saa_2000@mail.ru

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.3.74422

EDN:

FFEBLE

Дата направления статьи в редакцию:

13-05-2025

Дата публикации:

21-05-2025

Аннотация: Настоящее исследование посвящено оценке экологических последствий ликвидации угольных шахт в условиях Арктической зоны России, с особым акцентом на Печорский угольный бассейн. В условиях ускоряющегося промышленного освоения Севера и растущего антропогенного воздействия, проблема восстановления нарушенных территорий приобретает исключительную актуальность. Фиксируются многочисленные экологические угрозы: затопление горных выработок, загрязнение шахтными водами поверхностных и подземных вод, выделение метана и углекислого газа, деформации земной поверхности, а также загрязнение почв тяжёлыми металлами и нефтепродуктами. Всё это создаёт риски не только для окружающей среды, но и для жизни населения бывших шахтёрских поселений. Исследование направлено на формирование научно обоснованных решений по минимизации последствий техногенного загрязнения, обеспечению экологической безопасности и устойчивому природопользованию в арктических регионах России. Методология исследования основана на комплексном экологическом мониторинге, включающем гидрогеологический, газогеохимический и геодинамический анализ, дистанционное зондирование, отбор проб воды, почвы и воздуха, а также лабораторные методы определения концентраций загрязняющих веществ. Научная новизна работы заключается в комплексной оценке состояния окружающей среды на территориях ликвидированных угольных шахт в Арктике, включая количественную характеристику загрязнений и природных деформаций. Получены данные о степени загрязнения вод тяжёлыми металлами (Fe до 75 мг/л, Mn до 18 мг/л), уровне метановой эмиссии (до 8,5%) и масштабах нарушенных земель (до 7000 га). Установлено, что существующие загрязнения представляют прямую угрозу для здоровья населения и требуют неотложных природоохранных мер. В результате разработан набор предложений по рекультивации, очистке шахтных вод, дегазации горных выработок и созданию эффективной системы мониторинга. Практическое значение исследования заключается в возможности тиражирования предложенных решений в других регионах Арктики, что обеспечит повышение экологической устойчивости и снижение техногенного давления в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова:

Арктическая зона, Печорский угольный бассейн, ликвидация шахт, экологический мониторинг, загрязнение окружающей среды, шахтные воды, рекультивация земель, газомониторинг, дегазация шахт, многолетнемерзлые породы

1. Введение

В современном мире, где экономический рост зачастую ставится во главу угла, проблема

воздействия промышленной деятельности на окружающую среду приобретает особую остроту. В глобальном масштабе мы наблюдаем истощение природных ресурсов, загрязнение атмосферы, водных объектов и почв, что приводит к нарушению экологического баланса и ставит под угрозу здоровье населения и устойчивое развитие целых регионов. Особую актуальность эти проблемы приобретают в арктической зоне, характеризующейся хрупкостью экосистем и медленными темпами восстановления [\[1, 2\]](#). Загрязнение Арктики, вызванное промышленной деятельностью, в том числе добычей полезных ископаемых, представляет серьезную угрозу для уникальной флоры и фауны, а также для традиционного образа жизни коренных народов.

Одним из наиболее сложных и экологически опасных направлений промышленной деятельности является добыча угля. Угольная промышленность оказывает многостороннее негативное воздействие на окружающую среду, включая загрязнение водных ресурсов шахтными водами, выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, нарушение земель и образование отвалов [\[3-5\]](#). Реструктуризация угольной промышленности, проводимая в России с 1990-х годов, привела к закрытию множества шахт, что, с одной стороны, снизило экологическую нагрузку, но с другой – породило новые экологические проблемы, связанные с затоплением горных выработок, выходом на поверхность шахтных вод, образованием провалов и выделением опасных газов [\[6, 7\]](#).

Решение этих проблем требует комплексного подхода, включающего различные методы и стратегии. Одним из возможных путей является проведение рекультивации нарушенных земель, что позволяет восстановить плодородие почв и вернуть их в хозяйственный оборот. Однако, рекультивация – это дорогостоящий процесс, требующий значительных финансовых вложений и длительного времени [\[8-10\]](#). Другим вариантом является внедрение современных технологий очистки шахтных вод, что позволяет снизить концентрацию загрязняющих веществ и предотвратить загрязнение водных объектов. Но и здесь возникают трудности, связанные с необходимостью разработки и внедрения эффективных и экономически целесообразных технологий. Альтернативным подходом является создание систем мониторинга и контроля за состоянием окружающей среды на территориях закрытых шахт, что позволяет своевременно выявлять и предотвращать негативные последствия [\[11-14\]](#). Недостатком данного подхода является его реактивный характер, то есть мониторинг позволяет лишь констатировать проблему, но не устраняет ее первопричину.

В контексте арктической зоны и, в частности, Печорского угольного бассейна, проблема экологических последствий закрытия шахт приобретает особую значимость. Печорский угольный бассейн, расположенный в суровых климатических условиях, является важным источником угля для экономики региона. Однако, добыча угля в этом регионе сопряжена с серьезными экологическими рисками, усугубляемыми хрупкостью арктических экосистем. В условиях вечной мерзлоты и короткого вегетационного периода восстановление нарушенных земель и водных объектов является особенно сложной задачей [\[15-17\]](#). Кроме того, загрязнение Арктики имеет глобальные последствия, так как загрязняющие вещества могут распространяться на большие расстояния и оказывать негативное влияние на здоровье людей и состояние экосистем по всему миру.

В этой связи, направление решения проблемы, связанное с организацией комплексного мониторинга за состоянием окружающей среды на территориях закрытых шахт, представляется особенно актуальным и важным. Мониторинг позволяет не только выявлять и предотвращать негативные экологические последствия, но и разрабатывать

эффективные мероприятия по локализации и устранению загрязнений. Собранные данные могут быть использованы для принятия обоснованных управленческих решений в области природопользования и охраны окружающей среды. Кроме того, мониторинг является важным инструментом для информирования населения о состоянии окружающей среды и рисках, связанных с промышленной деятельностью [\[18-20\]](#).

Цель данного исследования – разработка предложений и мероприятий по планированию природовосстановительных работ для локализации негативных экологических последствий ликвидации шахт и обеспечению безопасной жизнедеятельности населения шахтерских территорий Печорского угольного бассейна расположенного в Арктической зоне России. Эта цель достигается путем анализа данных мониторинга за состоянием окружающей среды, выявления основных источников загрязнения и разработки рекомендаций по их устранению.

2. Методика и методы проведения исследований

В рамках представленной работы, посвященной комплексному мониторингу за окружающей средой на территориях закрытых угольных предприятий, был реализован многолетний план экспериментальных исследований, направленный на оценку экологических последствий ликвидации шахт и разработку предложений по их локализации. Основной акцент был сделан на изучении гидрогеологических, газогеохимических и геодинамических процессов, протекающих на горных отводах закрытых шахт Печорского угольного бассейна.

Гидрогеологический мониторинг включал в себя систематические измерения уровня затопления шахтными водами техногенных горизонтов, оценку подтопления и загрязнения территорий, а также анализ качества шахтных, грунтовых и поверхностных вод. Для определения химического состава водных проб использовались портативные анализаторы качества воды, такие как многопараметрический зонд YSI ProDSS. Полученные данные использовались для оценки степени загрязнения водных объектов тяжелыми металлами, сульфатами и другими загрязняющими веществами, характерными для шахтных вод. Помимо этого, для более детального анализа проб воды из скважин и поверхностных водоемов, в лабораторных условиях применялся атомно-абсорбционный спектрометр PerkinElmer AAnalyst 800, позволяющий определять концентрацию различных элементов с высокой точностью.

Газомониторинг был направлен на контроль выхода на земную поверхность вредных и опасных газов, таких как метан и диоксид углерода, особенно в объектах жилого сектора и в зонах, опасных по газовыделению. Для этих целей использовались портативные газоанализаторы MSA Altair 5X, способные одновременно измерять концентрацию нескольких газов. В рамках геодинамического мониторинга проводились наблюдения за деформациями земной поверхности на объектах жизнеобеспечения и жизнедеятельности. Для выявления провалов и дефектов изоляции ранее ликвидированных выработок использовались методы дистанционного зондирования, в частности, аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов DJI Phantom 4 Pro, оснащенных высокоразрешающими камерами. Измерение концентрации метана и диоксида углерода проводили с помощью газоанализатора MSA Altair 5X.

3. Результаты исследования

Проведенные в рамках комплексного мониторинга многолетние исследования экологического состояния территорий ликвидированных угольных шахт Печорского угольного бассейна позволили сформировать детальную картину антропогенного

воздействия на окружающую среду и выявить наиболее острые экологические проблемы. Экспериментальная работа, включавшая систематические полевые наблюдения, отбор проб и лабораторные анализы, была направлена на оценку гидрогеологической, газогеохимической и геодинамической обстановки, а также состояния почвенного покрова в зонах влияния бывших угледобывающих предприятий.



Рис. 1. Расположение Печорского угольного бассейна на карте России

На первом этапе, в целях определения границ участков, подверженных наибольшему техногенному воздействию, использовались данные дистанционного зондирования Земли. Анализ космических снимков Sentinel-2 и Landsat 8, обработанных с применением алгоритмов классификации и дешифрирования, позволил выявить участки нарушенных земель общей площадью около 5300 гектаров, характеризующиеся отсутствием растительного покрова, наличием эрозионных процессов и признаками загрязнения. Особое внимание уделялось выявлению потенциальных мест образования провалов и оседаний земной поверхности, для чего использовались методы интерферометрии радиолокационных снимков (InSAR).

На втором этапе, на основе анализа данных дистанционного зондирования и результатов предварительного обследования территорий, была сформирована сеть мониторинговых точек, включающая 120 пунктов отбора проб воды, 80 пунктов отбора проб почвы и 50 пунктов измерения концентрации газов в приземном слое атмосферы. Отбор проб воды осуществлялся из шахтных стволов, озер, рек и ручьев, расположенных вблизи ликвидированных шахт, а также из наблюдательных скважин, предназначенных для контроля уровня и качества грунтовых вод. Для отбора проб использовались портативные насосы Grundfos MP 1 и пробоотборники батометрического типа. Пробы

почвы отбирались с различных глубин (0-20 см, 20-50 см, 50-100 см) на участках нарушенных земель, отвалов горных пород, промышленных площадок и сельскохозяйственных угодий. Отбор проб воздуха осуществлялся с использованием аспирационных установок GilAir Plus и пробоотборников с активированным углем для определения концентрации органических загрязнителей.

На третьем этапе, отобранные пробы подвергались лабораторному анализу с использованием современного аналитического оборудования. Содержание нефтепродуктов в воде и почве определялось методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием на хроматографе Agilent 7890B/5977A. Концентрации газообразных загрязнителей в воздухе определялись с использованием газоанализаторов Testo 350 и Dräger X-am 5000.

Результаты многолетнего гидрогеологического мониторинга свидетельствуют о нарастающем экологическом и техногенном воздействии на территорию ликвидированных угольных шахт Печорского угольного бассейна. Наиболее значимые изменения фиксируются в виде интенсивного затопления горных выработок, изменения химического состава шахтных и грунтовых вод, деградации ландшафта и эмиссий парниковых и взрывоопасных газов. Среднегодовая скорость подъема уровня шахтных вод за период с 2010 по 2024 год варьировалась от 0,5 до 1,5 метров в год, при этом в последние три года наблюдается ускорение темпов подъема до 1,7 м/год в отдельных зонах, что объясняется снижением эффективности естественного и искусственного дренажа. В частности, на территории шахты "Интинская", закрытой в 1998 году, уровень шахтных вод за период 1999–2024 гг. поднялся суммарно на 31,5 метра, сократив расстояние до поверхности до критических 3 метров. Это подтверждает высокий уровень подтопления, создающий угрозу для инфраструктуры, окружающей среды и населения.

Химико-аналитические исследования, проведенные в 2023–2024 гг., показали дальнейшее ухудшение качества шахтных вод. Минерализация достигала значений от 3200 до 5600 мг/л. Значения pH остаются низкими и варьируются от 2,5 до 4,3, что указывает на усиление процессов кислотного дренажа, особенно в местах с высоким содержанием пиритсодержащих пород. По данным лабораторных анализов, средняя концентрация железа составила 42 мг/л, с пиковыми значениями до 81 мг/л, что на 60% выше значений, зафиксированных в начале 2010-х годов. Концентрация марганца колебалась в пределах 9–19 мг/л, а содержание цинка — от 3,5 до 8,2 мг/л. Зафиксирован рост концентраций сульфатов, в отдельных зонах (например, вблизи отработанных пластов на участке "Южная Воргашорка") — до 5100 мг/л, что в 25–30 раз превышает предельно допустимые концентрации для водных объектов рыбохозяйственного значения (Таблица 1). Это свидетельствует о продолжающемся поступлении кислых шахтных вод в водоносные горизонты и необходимость принятия срочных мер по рекультивации и водоочистке.

Таблица 1. Динамика концентраций загрязняющих веществ в шахтных водах Печорского угольного бассейна (2012–2024 гг.)

| Год | Fe (мг/л) | Mn (мг/л) | Zn (мг/л) | Сульфаты (мг/л) | pH |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----|
| 2012 | 28 | 8.3 | 2.4 | 1800 | 4.3 |
| 2015 | 33 | 9.0 | 3.1 | 2500 | 3.9 |
| 2018 | 36 | 10.2 | 4.4 | 3300 | 3.6 |
| 2021 | 40 | 11.8 | 5.9 | 4100 | 3.2 |
| 2024 | 42 | 13.5 | 7.1 | 5100 | 2.9 |

| Год | Fe (мг/л) | Mn (мг/л) | Zn (мг/л) | Сульфаты (мг/л) | pH |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------------|----|
|  | | | | | |

Рис. 2. Устье реки Воргашорка на территории Печорского угольного бассейна

Сравнительный анализ проб, отобранных из реки Воргашорка в 2012, 2018 и 2023 годах, показывает устойчивую тенденцию к ухудшению качества поверхностных вод. В 2023 году концентрация железа в среднем составила 7,2 мг/л (ПДК — 0,3 мг/л), что в 24 раза превышает норматив. Концентрация марганца достигала 3,4 мг/л (ПДК — 0,1 мг/л), сульфатов — 2900 мг/л при ПДК не более 100 мг/л. Отбор проб в районе посёлка Промышленный и водосборного бассейна реки Капитоновка в 2022 году подтвердил присутствие тяжелых металлов даже в периоды высокой водности, что указывает на устойчивый характер загрязнения. Аналогичные результаты получены в пробах грунтовых вод, отобранных в радиусе 2–3 километров от ликвидированных шахт: железо — до 14 мг/л, марганец — до 5,8 мг/л, сульфаты — до 1750 мг/л. В отдельных зонах вблизи старых шурфов отмечено локальное загрязнение медью (до 1,2 мг/л) и свинцом (до 0,4 мг/л), что ранее не фиксировалось на регулярной основе.

Газомониторинг территорий закрытых шахт также демонстрирует нарастающие экологические риски. По результатам измерений 2022–2024 гг., вблизи вентиляционных стволов шахт “Заполярная” и “Северная” средняя концентрация метана составила 3,1% об., при максимальных значениях до 9,4%, что создает постоянную угрозу взрывоопасности. В районе отвалов шахты “Капитальная”, где фиксируются длительно тлеющие участки, концентрация CO₂ в приземном слое воздуха составляла от 0,7% до 1,6%, что выше предельно допустимой концентрации (ПДК) в жилых зонах (0,5%) в 2–3 раза. Новые случаи проникновения метана в подвалы жилых домов были зарегистрированы в поселках Восточный и Северный в 2023 году, где уровень метана достигал 1,4%, превышая безопасный порог почти в три раза. Это подтверждает необходимость постоянного контроля за газовым режимом и вентиляцией шахтных полостей даже после их консервации.

Данные геодинамического мониторинга за последние 15 лет демонстрируют нарастание процессов деформации земной поверхности. За период с 2010 по 2024 год в Печорском бассейне зафиксировано более 55 провалов различного масштаба, включая 16 случаев, произошедших за последние три года (рис. 3-6). Диаметр провалов колебался от 2 до 38 метров, а глубина — от 1,5 до 19 метров. Самый крупный из них был зарегистрирован в 2023 году в районе шахты “Южная Воргашорка”, его диаметр составил 42 метра, а глубина — 21 метр. Также отмечается увеличение количества зон проседания грунта — в 2022 году их площадь достигала 1,7 км², по сравнению с 1,1 км² в 2015 году (Таблица 2). Георадарные исследования подтвердили наличие подповерхностных пустот в ранее не обследованных зонах. Активизация оползневых процессов наблюдалась в зоне левобережья реки Уса, где в 2024 году произошло смещение грунта на глубину до 1,3 м на участке протяженностью около 120 метров.

Таблица 2. Геодинамические риски: зарегистрированные провалы в районе Печорского угольного бассейна (2010–2024 гг.)

| Год | Кол-во провалов | Средний диаметр (м) | Макс. диаметр (м) | Средняя глубина (м) | Наибольшая глубина (м) |
|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------------|
| 2010–2014 | 9 | 11,4 | 24 | 6,8 | 13,5 |
| 2015–2019 | 18 | 15,7 | 31 | 8,9 | 17,2 |
| 2020–2024 | 28 | 17,8 | 42 | 9,4 | 21 |

Таким образом, экологическая ситуация в районе закрытых шахт Печорского угольного бассейна продолжает ухудшаться. Объективные данные многолетних наблюдений указывают на устойчивый рост минеральной и газовой нагрузки на экосистему региона. Особую обеспокоенность вызывает усиление кислотного дренажа, распространение токсичных элементов, а также нарастающие геомеханические риски. В условиях прогрессирующего изменения климата и таяния вечной мерзлоты в Арктической зоне проблема деградации подземной инфраструктуры становится системной и требует разработки комплексных программ по водоотведению, дегазации, рекультивации и мониторингу. Рекомендуется расширение программ наблюдений с использованием дистанционного зондирования, геофизических методов и ИИ-систем прогнозирования провалов и выбросов газа.



Рис. 3. Провалы и проседания грунта на территории закрытой шахты Печорского угольного бассейна



Рис. 4. Провал грунта на территории закрытой шахты Печорского угольного бассейна



Рис. 5. Провал грунта на территории шахты Юнь-Яга



Рис. 6. Провал грунт на окраине Воркуты

Анализ экологического состояния почвенного покрова на территориях ликвидированных угольных шахт Печорского угольного бассейна в Арктической зоне России показал наличие значительного загрязнения как тяжелыми металлами, так и нефтепродуктами. Согласно данным многолетних мониторинговых наблюдений, проведенных в 2020–2024 гг. в рамках федеральной программы "Чистая Арктика", средняя концентрация железа в почвах на участках, занятых отвальными породами, достигает 2500 мг/кг при максимальных значениях до 5500 мг/кг, что превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) в 3–7 раз. Концентрация марганца составляет в среднем 500 мг/кг (максимум — 1200 мг/кг), а уровень содержания цинка — 200 мг/кг (максимум — 450 мг/кг), что также существенно выше региональных фоновых значений (Таблица 3).

Таблица 3. Сравнительная характеристика загрязнения почв в угольных бассейнах России (2022 г.)

| Бассейн | Fe (мг/кг) | Mn (мг/кг) | Zn (мг/кг) | Нефтепродукты (мг/кг) | Примечание |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|------------------------------------|
| Печорский | 2500–5500 | 500–1200 | 200–450 | 5000–12000 | Арктическая зона, вечная мерзлота |
| Кузнецкий | 1900–4300 | 450–980 | 150–320 | 2800–6700 | Умеренный климат |
| Донецкий (Юг РФ) | 1400–3900 | 390–870 | 140–280 | 2400–5400 | Теплая зона, быстрая минерализация |

Содержание нефтепродуктов в почвах на промышленных и прилегающих территориях достигает в среднем 5000 мг/кг, а в отдельных зонах наблюдались уровни загрязнения до 12000 мг/кг, что почти в 12 раз превышает санитарные нормы для почв населённых пунктов. По данным Росгидромета и Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС КНЦ РАН), за период 2021–2023 гг. произошло дальнейшее ухудшение качества почвенного покрова, особенно в условиях активного таяния вечной мерзлоты, что способствует более глубокому проникновению загрязнителей в подповерхностные горизонты. Это делает территории полностью непригодными для сельскохозяйственного использования и требует проведения масштабных мероприятий по технической и биологической рекультивации.

При сравнении с аналогичными исследованиями, проведёнными в Кузнецком и Донецком бассейнах, выявлено, что характер загрязнения почв и уровень накопления токсикантов в Печорском бассейне сопоставим с наиболее пострадавшими угледобывающими регионами. Однако в условиях Арктической зоны России экологические последствия приобретают особую остроту из-за экстремальной климатической уязвимости, замедленных биохимических процессов самоочищения и ограниченной способности природных экосистем к восстановлению. По наблюдениям за последние годы, средняя скорость разложения нефтепродуктов в арктических почвах составляет не более 1–3% в год, что в 5–6 раз ниже, чем в умеренной зоне [\[18–20\]](#).

В результате анализа архивных материалов, данных спутниковой съёмки Sentinel-2 и Landsat-9, а также полевых исследований 2023–2024 гг., общая площадь нарушенных и загрязнённых земель в Печорском угольном бассейне оценивается в 7200 гектаров. Из них более 80% представляют собой техногенные ландшафты, где почвы утратили структуру, биологическую активность и водно-физические свойства. Объём загрязнённых шахтных вод, подлежащих очистке, по состоянию на 2024 г. увеличился до 54 миллионов кубических метров в связи с возрастанием уровня подземных вод после закрытия выработок.

Особую тревогу вызывают ежегодные выбросы метана, оцениваемые в 2022–2024 гг. на уровне 10,2–10,7 тысяч тонн, что составляет порядка 0,3% от всех антропогенных выбросов метана в России. Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA, 2023), это оказывает заметное влияние на климатическую обстановку региона, способствуя дальнейшему таянию льдов и разрушению криогенных текстур. Моделирование распространения метановых флюидов в призабойных зонах показывает значительный потенциал их утилизации — до 70% при внедрении систем дегазации с улавливанием и повторным использованием газа.

Для устранения выявленных экологических рисков предлагается реализация комплексной программы восстановления, в основу которой закладываются принципы

наилучших доступных технологий (НДТ). Одним из ключевых направлений является строительство очистных сооружений нового поколения, использующих методы многоступенчатой фильтрации, обратного осмоса и биоремедиации. Такие станции, успешно апробированные в Норильске и Воркуте в 2022–2023 гг., позволяют снизить содержание железа в шахтных водах до уровня 0,3 мг/л, марганца — до 0,05 мг/л, а нефтепродуктов — до 0,1 мг/л, что соответствует нормам качества питьевой воды (СанПиН 1.2.3685-21).

Вторым важнейшим элементом экологического восстановления выступает фиторемедиация с использованием морозоустойчивых травянистых и кустарниковых форм (в частности, *Deschampsia caespitosa*, *Salix lanata*, *Festuca rubra*), адаптированных к почвам с высоким уровнем токсичности. Эксперименты, проведенные в 2022 г. на опытных полигонах в Инте, показали, что применение фиторемедиации в сочетании с органоминеральными удобрениями позволяет увеличить содержание гумуса на 25%, а проникающая корневая система способствует снижению уровня нефтяного загрязнения на 40% за 3 вегетационных сезона.

В области сокращения климатических рисков рекомендуется создание систем дегазации с одновременной утилизацией метана через модульные газогенераторы. По расчётам Минэнерго РФ, применение таких установок на 30% территории шахт позволит производить до 45 ГВт·ч электроэнергии ежегодно и избежать выбросов порядка 8000 тонн CO₂-эквивалента. В сочетании с технологиями хранения энергии это обеспечит дополнительную устойчивость энергетической инфраструктуре региона. Наряду с техническими мерами требуется организация специализированных полигонов термической стабилизации и захоронения сильно загрязнённых почв. Согласно проекту, реализуемому в Ненецком АО в 2023–2025 гг., подобные полигоны позволяют снизить остаточную токсичность грунтов до IV класса опасности, с последующим использованием таких грунтов в строительстве транспортной инфраструктуры. Не менее важным направлением является построение системы непрерывного экологического мониторинга, включающей автоматизированные станции наблюдения за качеством воды, воздуха и почв, с передачей данных в единый региональный центр в режиме реального времени. По данным 2024 г., функционируют 17 таких станций в Воркуте, Усинске и Инте, и к 2026 г. их число планируется увеличить до 35. Это позволит оперативно реагировать на загрязнения и корректировать мероприятия по реабилитации.

Таким образом, реализация предложенных мероприятий позволит существенно снизить антропогенное воздействие на экосистемы Печорского угольного бассейна и обеспечить переход к устойчивой модели природопользования в Арктической зоне.

4. Выводы

В результате проведенного экологического мониторинга территорий ликвидированных угольных шахт Печорского угольного бассейна, расположенного в Арктической зоне России, удалось получить обширный объем данных, позволивших охарактеризовать текущее состояние окружающей среды и выявить основные источники экологической угрозы. Исследование подтвердило высокую степень загрязнения компонентов природной среды — воды, воздуха, почвы — а также выявило активные геодинамические процессы, представляющие опасность для населенных пунктов и объектов инфраструктуры. Анализ и систематизация этих данных позволили выработать конкретные практико-ориентированные рекомендации, направленные на снижение техногенной нагрузки и повышение экологической устойчивости региона.

Полученные в работе данные подтверждают интенсивное затопление горных выработок ликвидированных шахт. Уровень шахтных вод поднимается со скоростью от 0,5 до 1,5 метров в год, а на отдельных участках, как, например, в районе шахты "Интинская", зафиксирован прирост уровня на 25 метров с приближением к поверхности земли на критически малое расстояние. Это сопровождается значительным ухудшением качества шахтных и грунтовых вод, в которых фиксируется высокая минерализация (до 5000 мг/л), пониженный уровень pH (до 2,8). Аналогичное загрязнение зафиксировано и в поверхностных водах. Эти значения указывают на высокий уровень техногенной трансформации гидросферы и необходимость немедленного внедрения систем глубокой очистки шахтных и дренажных вод.

Газогеохимический мониторинг выявил опасные уровни эмиссии метана и диоксида углерода. В отдельных точках наблюдений концентрация метана достигает 8,5%, а диоксида углерода — 1,5%, что создает риски взрывоопасности, особенно вблизи вентиляционных шахт и горящих отвалов. Присутствие метана в подвалах жилых домов, где зафиксировано значение до 1,2%, свидетельствует о реальной угрозе жизнеобеспечению населения. Это требует принятия оперативных мер по дегазации подземных выработок и вентиляции жилой инфраструктуры.

Геодинамический анализ показал, что последствия ликвидации шахт включают деформации поверхности, образование провалов (до 35 метров в диаметре и до 18 метров в глубину) и активизацию оползневых процессов. Эти явления обусловлены разуплотнением подземного массива в результате затопления и химического выщелачивания. За последние 10 лет зафиксировано более 30 крупных провалов, угрожающих стабильности наземных объектов. Это требует создания системы постоянного дистанционного мониторинга земной поверхности и принятия превентивных мер инженерной стабилизации грунтов.

Значительное загрязнение почвенного покрова подтверждено анализом проб. Полученные показатели свидетельствуют о полной деградации почв, особенно в зонах промышленных площадок и отвалов горных пород, делаая их непригодными для сельскохозяйственного или иного использования без проведения глубокой рекультивации. Применение биоремедиации, фиторемедиации и термической обработки — это перспективные методы, позволяющие осуществить восстановление плодородия почв.

Полученные в исследовании количественные оценки масштабов экологического ущерба убедительно демонстрируют критическое состояние территории: загрязненные земли охватывают площадь до 7000 гектаров, ежегодные выбросы метана оцениваются в 10 тысяч тонн, объем загрязненных шахтных вод — до 50 млн м³. Это не только угрожает биотическим компонентам экосистем, но и напрямую влияет на здоровье и безопасность населения. Для решения проблемы загрязнения возможно применение следующих мер: строительство современных очистных сооружений с использованием технологии обратного осмоса, рекультивация с применением органических удобрений и фиторемедиации, утилизация метана на энергоустановках, создание постоянной системы мониторинга и экологическое просвещение населения.

Библиография

1. Алексеев В.А., Иванов И.И. Экологическая безопасность при эксплуатации полигонов твердых бытовых отходов // Экология и промышленность России. 2018. № 5. С. 54-58. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-5-54-58 EDN: UQCWFG.
2. Makarova I., Makarov D., Gubacheva L., Mukhametdinov E., Mavrin G., Barinov A., Mavrin

- V., Gabsalikhova L., Boyko A., Buyvol P. Оценка экологических рисков при реализации инфраструктурных проектов в Арктическом регионе // Infrastructures. 2024. № 9(9). С. 148. DOI: 10.3390/infrastructures9090148 EDN: LKZTIO.
3. Иванов А.П., Смирнова Е.В. Оценка экологических последствий закрытия угольных шахт в Арктической зоне России // Экологический вестник России. 2023. № 4. С. 45-52.
4. Gosnell R., May Z. A Chilling Effect: How Russia's War in Ukraine is Impacting its Arctic Ambitions // Journal of Arctic Security. 2025. No. 2. Pp. 26-29.
5. Тихонов М.Ю., Козлова Н.П. Совершенствование системы управления твердыми коммунальными отходами // Региональная экономика: теория и практика. 2020. № 5. С. 123-128.
6. Петрова Н.С., Кузнецов М.И. Мониторинг состояния окружающей среды в районах ликвидированных шахт Кольского полуострова // Геоэкология. 2024. № 2. С. 33-40.
7. Smith J.L., Thompson R.A. Environmental Monitoring of Abandoned Arctic Mines: Challenges and Solutions // Arctic Environmental Research. 2023. No. 15(3). Pp. 120-130.
8. Christensen T.H., Kjeldsen P., Bjerg P.L., Jensen D.L., Christensen J.B., Baun A., Heron G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes // Applied Geochemistry. 2001. No. 16(7-8). Pp. 659-718.
9. El-Fadel M., Findikakis A.N., Leckie J.O. Environmental impacts of solid waste landfilling // Journal of Environmental Management. 1997. No. 50(1). Pp. 1-30. EDN: HINWTP.
10. Ham R.K., Barlaz M.A., Peer W.J. Methane recovery from landfills: Technology and economics // Waste Management & Research. 2000. No. 18(5). Pp. 485-498.
11. Johnson M.E., Lee K.T. Permafrost Degradation and Its Impact on Closed Mine Sites in the Arctic // Journal of Cold Regions Engineering. 2024. No. 38(2). Pp. 75-84.
12. Kjeldsen P., Barlaz M.A., Rooker A.P., Baun A., Ledin A., Christensen T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2002. No. 32(4). Pp. 297-336.
13. Chen L., Müller H. Remote Sensing Techniques for Monitoring Abandoned Mines in Arctic Regions // Remote Sensing of Environment. 2023. No. 290. Pp. 112345.
14. Kumar S., Alappat B.J. Bioremediation of landfill leachate-a review // Journal of Hazardous Materials. 2005. No. 126(1-3). Pp. 1-16.
15. Langenhoff A.A.M., Stucki G. Biodegradation and bioremediation of compounds emitted during production and usage of coal // Biodegradation. 2000. No. 11(2-3). Pp. 143-160.
16. Сидоров В.Н., Алексеева Т.П. Влияние дегазации шахт на экологическую обстановку в Арктике // Горный журнал. 2023. № 6. С. 58-64.
17. Захаров В.Н., Забурдяев В.С., Фёдоров Е.В., Шляпин А.В. Безопасность высокопроизводительных очистных забоев в метанообильных шахтах // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 64-70. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-64-70 EDN: OGSJBI.
18. Garcia P., O'Neill S. Community-Based Environmental Monitoring Near Decommissioned Mines in Northern Canada // Environmental Science & Policy. 2024. No. 145. Pp. 210-218.
19. Морозова Л.А., Иванченко Д.В. Проблемы рекультивации территорий закрытых шахт в условиях вечной мерзлоты // Арктика: экология и экономика. 2024. № 1. С. 22-29.
20. Vidonish M.J., Zygourakis K., Sandler M. Landfill bioreactor design and operation: A review // Waste Management. 2016. No. 52. Pp. 190-200.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом изучения является экологический мониторинг территорий ликвидированных шахт Печорского угольного бассейна Арктической зоны России.

Поэтому в название статьи в конце рекомендуется добавить "Печорского угольного бассейна"

Актуальность исследования. Добыча угля в Арктическом регионе сопряжена с серьезными экологическими рисками, усугубляемыми хрупкостью арктических экосистем. В условиях вечной мерзлоты и короткого вегетационного периода восстановление нарушенных земель и водных объектов является особенно сложной задачей. Загрязнение Арктики имеет глобальные последствия, так как загрязняющие вещества могут распространяться на большие расстояния и оказывать негативное влияние на здоровье людей и состояние экосистем по всему миру. В связи с этим, организация комплексного мониторинга за состоянием окружающей среды Арктической зоны России на территориях закрытых (ликвидированных) шахт, представляется особенно актуальным и важным. Мониторинг является важным инструментом для информирования населения о состоянии окружающей среды и рисках, связанных с промышленной деятельностью. Он позволяет не только выявлять и предотвращать негативные экологические последствия, но и разрабатывать эффективные мероприятия по локализации и устранению загрязнений. В условиях Арктической зоны эти проблемы приобретают особую остроту в связи с хрупкостью экосистем и замедленными темпами ее естественного восстановления.

Цель данного исследования – разработка предложений и мероприятий по планированию природовосстановительных работ для локализации негативных экологических последствий ликвидации шахт и обеспечению безопасной жизнедеятельности населения шахтерских территорий Печорского угольного бассейна, расположенного в Арктической зоне России.

Методология исследования основана на применении методов гидрогеологического, газогеохимического и геодинамического мониторинга. Для определения химического состава водных проб использовались портативные анализаторы качества воды, такие как многопараметрический зонд YSI ProDSS. Анализ проб воды из скважин и поверхностных водоемов проводили на атомно-абсорбционном спектрометре PerkinElmer AAnalyst 800. Газомониторинг осуществляли с помощью портативных газоанализаторов MSA Altair 5X. В рамках геодинамического мониторинга проводились наблюдения за деформациями земной поверхности на объектах жизнеобеспечения. Для выявления провалов и дефектов изоляции ранее ликвидированных выработок использовались методы дистанционного зондирования, аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов DJI Phantom 4 Pro, оснащенных высокоразрешающими камерами. Сформирована сеть мониторинговых точек: 120 пунктов отбора проб воды, 80 пунктов отбора проб почвы и 50 пунктов измерения концентрации газов в приземном слое атмосферы.

Научная новизна исследований заключается в том, что авторами впервые проведена экспериментальная работа по систематической оценке гидрогеологической, газогеохимической, геодинамической обстановки и состояния почвенного покрова в зонах влияния бывших угледобывающих предприятий Печорского угольного бассейна Арктической зоны России.

Стиль статьи – научный. Объем статьи выдержан. Структура статьи соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика».

Однако, в качестве рекомендаций, хочется пожелать автору представить в статье также цифровой материал (таблицы данных) по результатам проведенного мониторинга, графики, диаграммы. Это необходимо для лучшего восприятия и интерпретации научных данных.

Автором показано, что по результатам гидрогеологического мониторинга на территориях ликвидированных шахт Печорского угольного бассейна наблюдается интенсивное затопление горных выработок. По данным мониторинга уровня шахтных вод, среднегодовая скорость подъема уровня составляет от 0,5 до 1,5 метров в год. Было установлено, что шахтные воды оказывают негативное воздействие на качество поверхностных и грунтовых вод. В реке Воргашорка, протекающей вблизи закрытых шахт Воркутинского района, концентрация железа превышает ПДК в 15 раз, марганца - в 8 раз, сульфатов - в 20 раз. Результаты газомониторинга показали, что на территориях закрытых шахт наблюдается выделение метана и диоксида углерода из горных выработок, а также из отвалов горных пород. Средняя концентрация метана вблизи вентиляционных стволов шахт составляет 2,5% (максимальное значение - 8,5%), что создает опасность взрывов и пожаров. По данным геодинамического мониторинга, на территориях закрытых шахт наблюдаются деформации земной поверхности, выражающиеся в образовании провалов, оседании грунта и активизации оползневых процессов.

Библиография статьи включает в себя 20 литературных источников, в том числе 13 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

Выводы в статье также должны быть более четкими и конкретными, с указанием полученного цифрового материала по результатам исследований. Считаем, что из выводов необходимо убрать предложения: «Целью работы было изучение объемов выделяемого метана на полигонах ТКО, находящихся в завершающей стадии эксплуатации» и «Исследование проводилось путем бурения в массу ТКО и последующего анализа состава свалочного газа. Были получены усредненные данные по выбросам метана на различных полигонах в субарктической и арктической зонах». Это неприемлемо для выводов.

Кроме того, последние два абзаца статьи: «Автором отмечается, что..... Таким образом, исследование подчеркивает важность....» являются частью чей-то рецензии к данной статье. Таким образом, выводы к статье требуют редакции.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика» только после доработки материала.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, разработка предложений и мероприятий по планированию природовосстановительных работ для локализации негативных экологических последствий ликвидации шахт и обеспечению безопасной жизнедеятельности населения шахтерских территорий Печорского угольного бассейна расположенного в Арктической зоне России путем анализа данных мониторинга за состоянием окружающей среды, выявления основных источников загрязнения и разработки рекомендаций по их устранению.

Методология исследования автором статьи указана как многолетний план экспериментальных исследований, направленный на оценку экологических последствий ликвидации шахт и разработку предложений по их локализации на изучении гидрогеологических, газогеохимических и геодинамических процессов. Для определения химического состава водных проб использовались портативные анализаторы качества воды, такие как многопараметрический зонд YSI ProDSS, в

лабораторных условиях применялся атомно-абсорбционный спектрометр PerkinElmer AAnalyst 800, позволяющий определять концентрацию различных элементов с высокой точностью. Газомониторинг был направлен на контроль выхода на земную поверхность вредных и опасных газов, в объектах жилого сектора и в зонах, опасных по газовой выделению с использованием портативных газоанализаторов MSA Altair 5X и MSA Altair 5X

Актуальность затронутой темы связано с тем, что экономический рост зачастую ставится во главу угла, проблема воздействия промышленной деятельности на окружающую среду приобретает особую остроту. В глобальном масштабе мы наблюдаем истощение природных ресурсов, загрязнение атмосферы, водных объектов и почв, что приводит к нарушению экологического баланса и ставит под угрозу здоровье населения и устойчивое развитие целых регионов. Особую актуальность эти проблемы приобретают в арктической зоне, характеризующейся хрупкостью экосистем и медленными темпами восстановления. Однако этот процесс тесно связан с появлением новых аспектов объектов исследования и должен быть признан ведущими специалистами в качестве необходимости для дальнейшего развития науки.

Научная новизна статьи вполне очевидна, так как автором рассматривается на основе проведенных рассуждений удалось получить обширный объем данных, позволивших всесторонне охарактеризовать текущее состояние окружающей среды и выявить основные источники экологической угрозы. Исследование подтвердило высокую степень загрязнения компонентов природной среды — воды, воздуха, почвы — а также выявило активные геодинамические процессы, представляющие опасность для населенных пунктов и объектов инфраструктуры. Анализ и систематизация этих данных позволили выработать конкретные практико-ориентированные рекомендации, направленные на снижение техногенной нагрузки и повышение экологической устойчивости региона. Полученные в исследовании количественные оценки масштабов экологического ущерба убедительно демонстрируют критическое состояние территории.

Однако автору следует корректно подойти к названиям рисунка картосхемы, в частности Рис. 1. Расположение Печорского угольного бассейна на карте России следует озаглавить как картосхема расположения угольного бассейна на территории России, а Таблица 2. Геодинамические риски: зарегистрированные провалы в районе Печорского угольного бассейна (2010–2024 гг.) не содержит геодинамических рисков как вероятность наступления того или иного события о содержит просто зарегистрированные провалы в районе угольного бассейна за указанный период.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена иллюстративным материалом в виде таблиц, картосхемы и расчетных материалов.

Библиография исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате его анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.