

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья



УДК 504.052



<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-49-60>



<https://elibrary.ru/qzzsjt>

Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации

Ольга Анатольевна Иванова

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
ola311200@mail.ru

Аннотация. В обзорной статье рассмотрены экологические последствия трансформации природной среды Кизеловского угольного бассейна (Пермский край) в посттехногенный период. Проанализированы основные источники загрязнения – изливы кислых шахтных вод и стоки с породных отвалов, приводящие к деградации поверхностных и подземных вод, почвенного покрова, донных отложений и растительности. Показано, что кислые шахтные воды характеризуются низкими значениями pH (2,3-4,0), высокой минерализацией и превышением ПДК по тяжёлым металлам в сотни и тысячи раз. Также, внимание уделено накоплению мышьяка и редкоземельных элементов, а также развитию негативных геологических процессов, включая образование провалов. Рассмотрены методы нейтрализации и рекультивации нарушенных территорий. Приведены результаты применения геоинформационных технологий, дистанционного зондирования и индекса NDVI для мониторинга состояния экосистем и эффективности рекультивации. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода к восстановлению природной среды КУБа с учётом природных, техногенных и социально-экономических факторов.

Ключевые слова: Кизеловский угольный бассейн, изливы кислых шахтных вод, стоки с породных отвалов, рекультивация

Для цитирования: Иванова О.А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 49-60. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-49-60>. EDN QZZSJT.

SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

Technogenic transformation of the natural environment of the Kizelovsky coal basin: environmental problems and ways of reclamation

Olga A. Ivanova

Perm State University, Perm, Russia
ola311200@mail.ru

Abstract. The review article examines the environmental consequences of the transformation of the nature of the Kizelovsky coal basin (Perm region) in the post-technological period. The main sources of pollution are analyzed – acid mine water spills and effluents from rock dumps, leading to degradation of surface and groundwater, soil cover, bottom sediments and vegetation. It has been shown that acid mine waters are characterized by low pH values (2,3-4,0), high mineralization, and hundreds and thousands of times higher than the maximum permissible concentration for heavy metals. Attention is also paid to the accumulation of arsenic and rare earth elements, as well as the development of negative geological processes, including the formation of sinkholes. Methods of neutralization and reclamation of disturbed territories are considered. The results of the application of geoinformation technologies, remote sensing and the NDVI index for monitoring the state of ecosystems and the effectiveness of remediation are presented. It is concluded that there is a need for an integrated approach to restoring the natural environment of Kizelovsky coal basin, taking into account natural, technogenic and socio-economic factors.

Key words: Kizelovsky coal basin, acid mine water outflows, effluents from rock dumps, reclamation

For citation: Ivanova, O., 2025. Technogenic transformation of the natural environment in the territory of the Kizelovsky coal basin: environmental problems and ways of reclamation. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 11(2), pp. 49-60. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-2-49-60>. EDN QZZSJT. (in Russian)



Введение

Тема трансформации природной среды в результате добычи угля в литературе рассматривается неоднократно. Это обусловлено тяжелыми последствиями, к которым приводит разработка угольных месторождений, более того, ликвидация предприятий по добыче угля в ряде случаев приводит к еще большим проблемам. Уголь является значимым для экономики России видом минерального сырья. По масштабу сырьевой базы угля Россия входит в число крупнейших угольных держав мира, по объему добычи страна занимает 6-е место с долей 4,4%. По состоянию на 01.01.2024 г. балансовые запасы угля, сосредоточенные в 22 угольных бассейнах и 147 отдельных месторождениях, составляют 272,7 млрд т. Дополнительно запасы каменного угля имеются в Донецкой (17,7 млрд т) и Луганской (17,8 млрд т) народных республиках [7]. Следовательно, вопросы изучения техногенной и посттехногенной трансформации природной среды для России являются весьма актуальными.

На нарушенных добычей угля территориях проводится большое количество научных исследований, позволяющих разработать комплексные меры рекультивации [14, 34, 41]. Примером таких пострадавших от угольной промышленности земель может служить Кизеловский угольный бассейн (КУБ), находящийся в Пермском крае Российской Федерации, в границах месторождения сейчас сложилась сложная экологическая ситуация, связанная с ликвидацией угольных шахт в связи с их нерентабельностью. Эксплуатация Кизеловского угольного бассейна велась с 1797 по 1997 гг. За время его эксплуатации общая площадь техногенных ландшафтов, утративших природные характеристики под влиянием угледобычи, составила 456 га [15].

География исследования включает территории Кизеловского, Губахинского, Гремячинского и Чусовского районов Пермского края. Площадь бассейна около 1500 км² [26]. Изучаемый район определяется следующими природно-географическими характеристиками: расположен в предгорьях Среднего Урала, относится к району средне- и южнотаежных предгорных пихтово-еловых и елово-пихтовых лесов, вследствие интенсивных рубок значительные площади покрыты вторичными березняками и смешанными лесами [32]. Климат умеренно-континентальный с холодной зимой и относительно теплым летом. Среднегодовое количество осадков – около 800 мм, что влияет на процессы вымывания и способствует промывному режиму территории [2]. Территория сложена преимущественно карбонатными и осадочными породами палеозойского возраста [26] с многочисленными угленосными слоями.

Анализ опубликованных научных источников показывает, что основными причинами неблагоприятной экологической ситуации в районе исследования являются изливы кислых шахтных вод и стоки с породных отвалов. Эти два, казалось бы, локальных явления приводят к ряду экологических проблем и задач [26]:

- загрязнение поверхностных вод и гидрографической сети района, что приводит к загрязнению крупных рек Пермского края, в их число входят р. Яйва, р. Чусовая, р. Косьва, которые являются притоками р. Кама (табл. 1 / табл. 1);
- загрязнение подземных вод;
- деградация почвенного покрова, почвы приобретают состояние кислых сульфатных почв;
- загрязнение донных отложений;
- деградация растительного покрова, особенно в местах изливов кислых шахтных вод;
- негативные геологические явления, провалы.

Таблица 1

Притоки р. Яйва, р. Косьва, р. Чусовая подверженные влиянию закрытых шахт КУБа [26]

Table 1

Tributaries of the Yayva River, Kosva River, and Chusovaya River affected by closed mines [26]

Река // River	Приток // Tributary					
Яйва // Yayva	Большой Кизел // Bol'shoy Kizel	Северная Вильва // Severnaya Vil'va	Вьяшчер // V'yashcher	Полуденний Кизел // Poludennyuy Kizel	Восточный Кизел // Vostochnyy Kizel	–
Косьва // Kosva	Шумиха // Shumikha	Губашка // Gubashka	Ладейный лог // Ladeyny log	Каменка // Kamenka	Берестянка // Berestaynka	–
Чусовая // Chusovaya	Усьва // Us'va	Южная Вильва // Yuzhnaya Vil'va	Глухая // Glukhaya	Половинка // Polovinka	Большая Гремячая // Bol'shaya Gremyachaya	Рудянка // Rudyanka

Исследования загрязнения подземных и поверхностных вод

Наибольшее беспокойство вызывает загрязненность водных объектов района. В монографии Н.Г. Максимовича, С.В. Пьянкова [26] отмечается, что для изливающихся на поверхность кислых шахтных вод характерна кислая реакция среды (pH 3-4), высокая степень минерализации (до 9,5 г/дм³), сульфатный состав, высокие концентрации ряда микроэлементов, прежде всего железа, алюминия, марганца, бериллия,

содержание которых превышает ПДКпп в сотни и тысячи раз. Суммарный расход стоков с породных отвалов в зависимости от количества осадков колеблется от 27,9 до 37,3 м³/ч [3]. Стоки с отвалов также характеризуются очень высоким содержанием загрязняющих веществ и кислой реакцией среды (pH 2,3-2,9) [19, 20]. При впадении в речную сеть загрязненные воды, смешиваясь с нейтральными природными водами, образуют осадок, представленный в основном аморфными

гидроксидами железа и алюминия характерного оранжевого цвета (рис. 1 / fig. 1) [21]. Анализ среднегодовых концентраций присутствующих загрязняющих веществ, превышающих ПДКр/х, в воде ряда рек Пермского края показал, что наиболее загрязненными реками в период 2019-2021 гг. являлись Косьва, Чусовая и Кама. Более грязной рекой является Косьва.

По мнению автора, главная причина ее загрязнения – выброс на поверхность земли шахтных вод закрытых выработок Кизеловского угольного бассейна [27].

В настоящее время на территории КУБа зафиксировано 19 изливов кислых шахтных вод. Три из них представляют собой изливающиеся скважины с небольшими расходами, которые не требуют строительства очистных сооружений, их необходимо затемпонировать [25].



Рис. 1. Техногенный осадок в местах выхода шахтных вод
Fig. 1. Technogenic sediment at the outlet of mine waters

В гидросферу бассейна наблюдается поступление мышьяка. Мышьяк поступает в поверхностные воды с изливами шахтных вод, в том числе из шахт «Им. Крупской», «Им. Володарского», «Им. Ленина», и других. Среднегодовое поступление мышьяка в речную сеть региона составляет около 554,7 кг/год. Водные потоки, загрязненные мышьяком, могут повлиять на качество воды и на флору и фауну в этих водоемах. В статье также подчеркивается, что мышьяк может находиться в различных химических формах, в том числе как арсенат и арсенит, в зависимости от условий окружающей среды [36].

В исследовании Е.В. Кирюшиной, И.В. Зенькова и Ле Хунг Чинь [17] авторы выделили виды техногенных ландшафтных объектов, из-за которых страдает речная сеть района (табл. 2 / tabl. 2): промышленные площадки закрытых шахт и шахтные терриконы. Закрытые шахтные стволы авторы определяли на космоснимках по следам водных потоков, изливающихся из них на земную поверхность. Общее количество отвалов на данной территории насчитывается более 70. В отвалах накоплено свыше 35 млн м³ породы [23].

Количество техногенных объектов после добычи угля подземным способом в границах бассейнов рек в центральной части Пермского края [17]

Таблица 2

The number of technogenic objects upon completion of underground coal mining within the boundaries of the river basins in the central part of the Perm Krai [17]

Table 2

Название реки (ручья) // Name of the river (stream)	Промышленная площадка шахты // The mine's industrial site	Шахтный террикон // Mining terriicon	Закрытый шахтный ствол // Closed mine shaft
Вьяшчер // V'yashcher	3	4	2
Восточный Кизел // Vostochnyy Kizel	5	1	4
Коспаш // Kospash	1	1	1
Полуденный Кизел // Poludennyy Kizel	9	14	10

Название реки (ручья) // Name of the river (stream)	Промышленная площадка шахты // The mine's industrial site	Шахтный террикон // Mining terriicon	Закрытый шахтный ствол // Closed mine shaft
Малый Полуденний Кизел // Maly Poludenny Kizel	3	2	2
Сухой Кизел // Sukhoy Kizel	2	3	2
Кизел // Kizel	2	13	2
Косая // Kosaya	3	5	2
Губашка // Gubashka	7	8	3
Косьва // Kosva	1	6	2
Берестянка // Berestaynka	2	1	1
Ладейный лог // Ladeyny log	2	2	2
Юбилейный (ручей) // Yubileynyy (stream)	1	2	1
Вильва (приток р. Чусовая) // Vil'va (a tributary of the Chusovaya River)	3	9	9
Усьва // Us'va	—	2	1
Итого	44	37	44

В статье И.В. Зенькова, Е.В. Кирюшиной, Переира Эдуардо Гусмана [13] аналогично подтверждается, что техногенное загрязнение продолжается после закрытия шахт. Методологическое исследование включает лабораторное моделирование поведения системы «попода–вода» для анализа выщелачивания токсичных веществ. Результаты моделирования показали, что вода способствует активации миграции тяжелых металлов и органических соединений, что приводит к повышению их геохимической подвижности и значительному загрязнению окружающей среды, поскольку установлено, что после взаимодействия с водой содержание в отходах подвижных форм Ni, Fe, Mn, Cd, Co возрастает в 2, а Zn, Cu, Cr – в 3 раза по сравнению с их исходным содержанием. Эти данные подтверждают длительный характер воздействия угольного производства на состояние среды и сложность решения проблемы техногенного загрязнения. Таким образом, автор приходит к выводу, что вода активирует миграцию токсичных элементов, таких как тяжелые металлы и органические соединения, что способствует дальнейшему загрязнению экосистем.

Исследования деградации почвенного покрова

Подземная добыча угля приводит к разрушению почвенного покрова на территориях, непосредственно занятых отвалами и расположенных поблизости с ними, а также в местах проседания, где часто образуются кислые озера [47]. Но ситуация на территории КУБа отличается тем, что помимо стоков с отвалов, огромное отрицательное влияние имеют изливы кислых шахтных вод, что делает его похожим на Верхнесилезский угольный бассейн в Польше, на Донецкий угольный бассейн, на месторождение угля Хуайнань в Китае, где так же наблюдается дренаж шахтных вод [8, 45, 46].

На территории КУБа образовались кислые сульфатные почвы. Постоянное поступление шахтных вод приводит к гидроморфизму почвы. Воздействие от породных отвалов на почвы ниже, чем от изливов, что связано с периодичностью осадков и возрастанием количества рекультивированных отвалов. На террито-

риях стока с отвалов образуются как химически-преобразованные почвы, так и техногенно-трансформированные, т.е. кроме изменения химических свойств происходят морфологические трансформации [29]. Помимо стоков с отвалов, почвенный покров страдает от выноса пыли с терриконов. Поскольку отвалы являются насыпями из горных пород на склонах гористого рельефа региона, то при любом направлении ветра с поверхности терриконов присутствует вынос пыли и вертикальное и горизонтальное ее перемещение на расстояние в зависимости от крупности частиц и силы ветра [17].

Почвы, подвергшиеся воздействию кислых шахтных вод, содержат значительно более высокие концентрации подвижных форм серы и железа, сульфатов. При воздействии кислых шахтных вод почвы претерпевают химические и физические трансформации, включая увеличение кислотности, изменение гранулометрического состава, а также потерю мелких фракций и увеличение содержания крупных частиц. В исследовании также с помощью использования рентгенофазового анализа подтверждено, наличие минералов гётита и ярозита в почвах, что также служит индикатором кислых сульфатных почв. Ярозит, в частности, играет ключевую роль в сохранении химически агрессивных условий в сульфатно-кислых почвах. По мнению авторов исследования, к его образованию причастны не только кислые сульфатные воды, но добавление активного ила при рекультивации [28]. Сходный процесс обнаружен на хвостохранилищах Дальнего Востока [50].

Немаловажным является изучение геохимических особенностей почв на территории КУБа. При этом возможно использование геоинформационных технологий. Основная цель исследований выявить последствия техногенного воздействия угледобычи, а также текущую степень загрязнения почвы после закрытия шахт. Для исследования Е.А. Дзюбы, С.А. Бузмакова, Ю.В. Хотяновской [44] были отобраны образцы почвы из двух горизонтов – гумусного и подзолистого. На основе данных геоинформационных технологий были составлены карты распределения металлов и элемен-

тов в почвах, что позволило определить зоны наибольшего загрязнения и процессы их накопления. Техногенная трансформация почв в районе КУБа выражается в накоплении Co, Mn, Ni, As, Cr, Zn, Sr в органогенном горизонте и Co, Mn, Ni, Cr в подгумусовом горизонте. В гумусовом горизонте накапливаются Co ($24 \pm 2,8$ мг/кг), Mn (1100 ± 155 мг/кг), Ni ($69 \pm 9,3$ мг/кг), As ($10 \pm 3,5$ мг/кг), Cr (178 ± 20 мг/кг), Zn ($80 \pm 7,8$ мг/кг) и Sr (221 ± 26 мг/кг). В подзолистом горизонте накапливаются Co ($24 \pm 1,8$ мг/кг), Mn (1000 ± 103 мг/кг), Ni ($60 \pm 6,4$ мг/кг) и Cr ($153 \pm 15,2$ мг/кг). Почвы КУБа имеют сидеро-халько-литофильную специализацию с кобальт-марганцево-полиметаллической ассоциацией. Это важный инструмент для мониторинга загрязнений и оценки экологических рисков в регионе [9].

Стоит отметить, что на территории КУБа выявлено повышенное содержание мышьяка, показатели которого сравнивали с фоновым содержанием [44]. Подобная ситуация происходит в Ростовской области, где в почвенных горизонтах наблюдается накопление тяжелых металлов, таких как Cu, Zn, Pb и Cd из-за угольных шахт и терриконов [43].

Исследования загрязнения донных отложений

Донные отложения на местах загрязнений приобретают характер техногенных осадков. Состав техногенных осадков коренным образом отличается от донных

отложений рек на фоновых участках. Техногенные осадки содержат значительное количество водорасторимых солей – 5–25 г/кг. Вытяжка имеет сульфатно-железистый состав и часто – кислые значения водородного показателя. Содержание подвижных форм загрязнителей в десятки и сотни раз превышает фоновые концентрации и составляет (мг/кг): сульфаты – 16 700, двухвалентное железо – 4550, трехвалентное железо – 720, марганец – 280, алюминий – 160, медь – 33, цинк – 23, никель – 18, кобальт – 12 [26].

Исследования восстановления экосистем

Статья, опубликованная в журнале Mining Science and Technology [30], отображает анализ химико-экологические свойства почв и использование индекса NDVI для оценки рекультивации сернистоугольных отвалов. Изучалась эффективность рекультивации угольных отвалов КУБа с целью восстановления экосистем (рис. 2 / fig. 2). Использование глинистых материалов и внесение извести в верхние слои отвала оказали положительное влияние на улучшение почвы и рост растительности. Использование индекса NDVI на основе спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat позволило отслеживать изменения растительности и подтвердить эффективность рекультивации.



Рис. 2. Картограммы динамики индекса растительности NDVI для отвала шахты «Центральная» [20]
Fig. 2. Cartograms of the dynamics of the NDVI vegetation index for the dump of the Tsentralnaya mine [20]

Аналогично, темпы самозарастания угольных отвалов рассмотрены в работах А.Н. Чащина и М.А. Кондратьевой [39]. Для оценки темпов зарастания угольных отвалов были использованы космические снимки высокого разрешения Landsat 5 (пространственное разрешение 30 м на пиксель), Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м на пиксель) и высокодетальные снимки (0,5 м) покрытия ESRI Satellite за разные даты. При проведении исследования, авторы пришли к выводам, что степень зарастания отвалов увеличивается соответственно с увеличением возраста отвала.

Стоит отметить, что различные экологические условия, влияют на видовой состав поселяющихся на отвалах растений. Сюда относятся зональность, литология, формы рельефа, температура, освещенность, влажность [6, 18]. А значительное видовое разнообразие и большое проективное покрытие на отвалах приводят к увеличению содержания органического вещества почвы (ускоряется переход к гумусо-аккумулятивной стадии) и макроэлементов [12]. Молодые примитивные почвы, формирующиеся на грунтах и отвалах, получили в научной литературе название эмбриоземов [1].

Подобное исследование проведено в Индии [49], авторы рассматривают проблему деградации земель в центральной Индии, вызванную угледобычей, и предлагает подходы к восстановлению экосистем в этом регионе с использованием геопространственных технологий и машинного обучения. В статье подчеркивается, как открытая угледобыча в районе Корбы привела к значительным изменениям в землепользовании и покрытии земель. Лесные территории сократились с 35,56% в 1995 г. до 14,06% в 2024 г., в то время как площадь угольных шахт увеличилась, что привело к потере биологических ресурсов, почвенной эрозии и исчезновению сельскохозяйственных земель. Для анализа изменений использовались данные спутниковых снимков (Landsat 5, 7, 9), а также различные индексы, такие как NDVI (индекс растительности), NDBI (индекс застроенности), и NDMI (индекс влажности почвы). Эти данные позволили количественно оценить степень деградации и уязвимости земель. Несмотря на усилия по рекультивации земель, включая посадку деревьев и стабилизацию почвы, эти меры оказались недостаточными для компенсации масштаба деградации.

Определение содержания редких и редкоземельных элементов в отвалах

Актуальное исследование провели П.А. Белкин, Р.Д. Переvoщиков, М.А. Волкова [4]. Авторы определяли содержание редких (Li, Ge, Ga) и редкоземельных элементов в породных отвалах КУБа. Редкоземельные элементы являются важным и крайне дефицитным видом сырья. Несмотря на свое название, редкоземельные элементы характеризуются достаточно высоким содержанием в земной коре. При этом, важнейшей особенностью РЗЭ является высокая степень рассредоточенности в земной коре, малое количество месторождений. Для изучения были отобраны пробы пород отвалов с поверхности, а также с глубины 0,5 м. Всего отобрано и исследовано 30 проб шахтных отвалов. Результаты выявленных концентраций редких и редкоземельных элементов в отвалах Кизеловского угольного бассейна показали значительную степень обогащения вещества всех исследованных отвалов литием, скандием и германием. Содержание галлия в породных отвалах шахт 40 лет Октября, Нагорная, Центральная, Шумихинская в 2-4 раза превышает кларк в осадочных горных породах. Содержание иттрия и лантаноидов в изученных отвалах значительно ниже кларковых значений.

Изучение недр

На территории Кизеловского угольного бассейна не исключены опасные геологические процессы. Кизеловский угольный бассейн практически полностью относится к Кизеловскому району карбонатного карста Западно-Уральской зоны складчатости. На поверхности карстующихся карбонатов сформированы толщи наносов, в той или иной степени задерживающие процесс карстообразования. Во время работы шахт по добывче угля велась откачка шахтных вод, что привело к оживлению процессов карстообразования. Шахтные воды, в составе которых присутствует серная кислота, интенсифицировали процессы растворения пород [16].

Поверхностные карстовые формы преимущественно представлены воронками, котловинами, уступами, гротами, логами, суходолами, слепыми долинами и долинами карстовых рек., пещерами. В Кизеловском районе карбонатного карста, расположенного от верхнего течения р. Язвы на юг до междуречья Усьвы и Вильвы известно более 200 пещер в карбонатных породах девона, карбона и перми. Наиболее крупные из них Кизеловская Виашерская (7600 м), Геолог-2 (3400 м), Российская (1450 м), Тёмная (1300 м), Мариинская (1000 м). В Чусовском районе карбонатного карста, который является южным продолжением Кизеловского района, известны 95 пещер в карбонатных породах девона и карбона. Одной из длиннейших пещер Пермского края является пещера Российская, которая находится на дне карстовой воронки в суходоле Ладейный Лог, в 5,2 км от р. Косьвы. В пещере найдены различные натечные образования, криогенные минералы. Недалеко, в 3,5 км от р. Косьвы, находится еще одна пещера – Обвальная [16, 22].

Ежегодно визуально обследуется 993 га территории горных отводов ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна по выявлению провалов земной поверхности. Проводятся работы по их ликвидации. Выявляемые провалы, как правило, образовываются в устьях ранее ликвидированных горных выработок, выходящих на дневную поверхность, так и в результате разрушения целиков угля над очистными выработками верхних горизонтов шахт. По анализу результатов проведенных наблюдений и обследований с учетом имеющейся информации можно констатировать, что процессы сдвижения земной поверхности, несмотря на давний срок окончания горных работ, не затухают на всей территории Кизеловского угольного бассейна. Количество и характеристика выявленных провалов приведена в табл. 3 / tabl. 3 [10, 11].

Таблица 3

Количество провалов, выявленных с период с 2019 по 2024 гг. [10, 11]

Table 3

The number of karst sinkholes identified from 2019 to 2024 [10, 11]

Год // Year	Количество выявленных провалов, шт. // Number of identified sinkholes, pcs.	Объем выявленных провалов, м ³ // Volume of identified sinkholes, m ³
2019	28	17 834,0
2020	30	9 034,0
2021	36	7 388,0
2022	30	13 602,2
2023	26	8 814,0
2024	27	5 881,0

Исследования способов рекультивации нарушенных территорий

За последние десятилетия было разработано множество методовнейтрализации шахтных вод и удаления из них тяжелых металлов [31, 42, 48]. Поскольку проблема кислотного дренажа на заброшенных рудниках актуальна для многих регионов мира, то специалисты продолжают разрабатывать подходы к выбору наиболее оптимальных методов решения этой проблемы.

Методы очистки шахтных вод подбираются в зависимости от химических характеристик, объема дре-

нажа и имеющихся ресурсов для строительства и поддержания системы обработки воды. Существующие системы очистки кислотного дренажа шахт могут быть классифицированы как пассивные и активные, при этом обе системы потенциально сочетают в себе физические, биологические и химические подходы [35, 37]:

1. Активные методы:

Требуют постоянной подачи реагентов, энергии, персонала и инфраструктуры. Химическими реагентами являются известковое молоко ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), известняк (CaCO_3), сода (Na_2CO_3), гидроксид калия (KOH), каустическая сода (NaOH), аммиачная вода (NH_4OH). К этим методам относятся коагуляция и флокуляция,

флотация, сорбция, ионообмен, электрохимические методы.

Преимущества: высокая эффективность, быстрый результат.

Недостатки: дорого, нужно обслуживание, много реагентов и энергии.

2. Пассивные методы:

Основаны на естественных биологических, химических и физических процессах. Не требуют постоянного обслуживания, используют природные или дешёвые материалы. Вариантами пассивной обработки являются фильтрующие дамбы и каналы (геохимические барьеры), пруды-отстойники, осветлители и каскады, водно-болотные угодья. Материалами служат известняк, органические субстраты (торф, древесные отходы), побочные продукты промышленности (доменный шлак, сталеплавильный шлак).

Преимущества: низкая стоимость, автономность, длительная работа.

Недостатки: большие площади, медленные процессы, ограничена эффективность при высоких кислотностях и дебитах.

Последние исследования по борьбе с кислыми дренажными водами Кизеловского угольного бассейна рассматривают подходы, направленные на снижение объемов изливающихся шахтных вод (за счет тампонирования горных выработок, возведения перемычек, перехвата поверхностного стока, водопонижения или откачки подземных вод) [38].

При выборе методов рекультивации необходимо учитывать не только химические параметры, но и природные, техногенные и социально-экономические факторы (наличие площадей, доступность материалов, утилизация осадков, финансирование). В исследовании Н.В. Митраковой с соавторами [31] рассмотрены изменения, произошедшие с почвами на участке сброса кислых шахтных вод, которые были рекультивированы в 2005 г. Наиболее подробно вопросами рекультивации отвалов КУБа стали заниматься с момента ликвидации шахт (с конца 90-х гг. прошлого столетия и по настоящее время) [5]. На участке сброса шахтных вод была проведена рекультивация с использованием щелочных отходов (CaCO_3) и активного ила, что способствовало нейтрализации кислотности почвы и улучшению её структуры. Рекультивация привела к образованию технозема с улучшенными физико-химическими свойствами. На рекультивированном участке был восстановлен устойчивый фитоценоз, включая различные виды деревьев и трав. Исследования показали, что в рекультивированных почвах значительно снизилась кислотность, увеличилось содержание органического вещества, а также улучшилась способность почвы к удержанию питательных веществ. Однако в почвах все ещё присутствуют следы сульфидных минералов. В почвах были выявлены повышенные уровни некоторых микроэлементов (например, Li, B, Fe, Co), но комплексная геохимическая оценка показала, что загрязнение в целом на рекультивированном участке ниже, чем на нерекультивированном. В целом, результаты исследования демонстрируют успешность рекультивации в снижении кислотности и улучшении экологического состояния почвы, а также показывают, как использование щелочных отходов и активного ила

может существенно повлиять на восстановление экосистем в районах угледобычи [31].

Ещё одним природоохранным методом является применение геохимических барьеров. Н.Г. Максимовичем было предложено использовать для очистки кислых шахтных вод щелочные отходы содового производства, миллионы тонн которых накопились и продолжают поступать в расположенный в относительной близости от ликвидированных шахт КУБа шламонакопитель АО «Березниковский содовый завод» [24].

В исследованиях М.А. Осинцевой с соавторами и С.В. Чмыхаловой с соавторами [33, 40] рассматриваются особенности рекультивации на территориях бывшей добычи угля. Эти исследования предоставляют ценные данные и рекомендации для разработки стратегий восстановления экосистем в районах, пострадавших от угледобычи, и могут быть использованы для совершенствования практик рекультивации на территории Кизеловского угольного бассейна.

Авторами предлагаются следующие способы восстановления экосистем [33, 40]:

1. Разработка методики восстановления растительных сообществ.
2. Формирование устойчивых лесных насаждений на отвалах угольной промышленности.
3. Экологическая оценка нарушенных земель для определения комплекса мер по рекультивации земель с учетом биоразнообразия.
4. Восстановление нарушенных горным производством земель, создание условий функционирования восстановленной территории.
5. Учет особенностей развития региона путем территориального планирования и воспроизводства природных ресурсов, предусматривающих гармоничное восстановление всех элементов ландшафта с учетом хозяйственных, природных, культурных, санитарно-гигиенических и других требований общества.

Заключение

Результаты анализа научной литературы показали, что техногенное воздействие угледобычи на природу Кизеловского угольного бассейна привело к значительным изменениям в экосистемах района.

Основными экологическими проблемами являются загрязнение водных ресурсов кислыми изливами, выходящими из закрытых шахт, а также стоками с породных отвалов, содержащими высокие концентрации тяжёлых металлов (железа, алюминия, марганца) и мышьяка. Эти загрязняющие вещества существенно превышают предельно допустимые концентрации и оказывают негативное влияние на качество вод, почвы и флору. Водные объекты, такие как реки Яива, Косьва и Чусовая, страдают от кислых загрязнений, что приводит к ухудшению экосистем.

Особое внимание стоит уделять деградации почв, которые в результате воздействия с источниками загрязнения превращаются в сульфатные почвы с высокой кислотностью и потерей структурных свойств.

Для восстановления природной среды и нейтрализации последствий угледобычи на территории Кизеловского угольного бассейна требуется использование комплексных методов рекультивации. Применение геоинформационных технологий, дистанционного зондирования и анализа растительности с помощью

индекса NDVI показало свою эффективность для мониторинга состояния экосистем и оценки успешности рекультивации. Это позволило более точно отслеживать изменения в экосистемах и корректировать стратегии восстановления.

Тем не менее, несмотря на успехи в рекультивации, необходимо отметить, что процессы восстановления экосистем в районах угледобычи являются длительными и требуют многолетней работы, включающей мониторинг и управление загрязнением. Для достижения устойчивого восстановления природных экосистем в регионе необходимо продолжать работы по очистке загрязнённых вод, восстановлению растительности, а также проведению научных исследований, направленных на повышение эффективности рекультивации и минимизацию воздействия угледобычи на окружающую среду. Важно учитывать как геохимические, так и социально-экономические аспекты, включая доступность материалов для рекультивации, ресурсы для строительства очистных сооружений и взаимодействие с местным населением.

Список источников

1. Андроханов В.А., Берлякова О.Г. Состояние лесных культур и почвенного покрова на рекультивированном отвале угольного разреза // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 20-29.
2. Атлас Пермского края / под общ. ред. А.М. Тартаковского. Пермь: ПГНИУ, 2012. 124 с.
3. Бачурин Б.А. Геохимические аспекты техногенеза Кизеловского угольного бассейна // Горный журнал. 2018. № 6. С. 40-45. <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2018.06.08>
4. Белкин П.А., Переvoщиков Р.Д., Волкова М.А. Редкие и редкоземельные элементы в породных отвалах Кизеловского угольного бассейна // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2021. № 4(41). С. 288-293.
5. Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Зайцев А.Г. Агрохимическая характеристика верхнего слоя грунта на угольных терриконах и влияние глинования на их естественное зарастывание (на примере Кизеловского угольного бассейна) // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды : сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, Пермь, 21-22 апреля 2022 г. / отв. ред. С.А. Бузмаков. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 437-441.
6. Ворончихина Е.А. Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты. П.: РИО ПГУ, 2010. 163 с.
7. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ в 2023 году / под общ. ред. Д.Д. Тетенькина, О.В. Казанова. М.: ФГБУ «ВИМС», 2024. 710 с.
8. Гулейчук Н.И., Гомаль И.И. Обобщенная качественная оценка влияния угольных предприятий на гидроэкосистему Донбасса // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 10-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 28–30 мая 2024 г. / отв. ред. М.С. Зорина, Б.В. Бурлуцкий. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. С. 122-128.
9. Дзюба Е.А. Природно-техногенное геохимическое районирование Пермского края // Географический вестник. 2024. № 3(70). С. 139-151.
10. Доклад О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2023 году. Пермь, 2023. С. 222.
11. Доклад О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2024 году. Пермь. 2024. С. 236.
12. Жуков А.А., Жукова Е.Ю. Особенности сукцессии растительности на примере рекультивированного отвала угольного разреза "Черногорский" // Лесохозяйственная информация. 2022. № 3. С. 114-124.
13. Зеньков И.В., Кирюшина Е.В., Переира Э.Г., Юронен Ю.П. Исследование экологических проблем после завершения подземных горных работ по добыче угля в Новгородской и Тверской областях // Уголь. 2025. № 1. С. 109-112.
14. Зеньков И.В., Нефедов Н.Б., Морин А.С. Технология рекультивации земель при разработке угольных месторождений в северных регионах России // Уголь. 2020. № 4(1129). С. 62-67.
15. Каракульева А.А., Кондратьева М.А. Свойства эмбриоземов угольных отвалов Кизеловского бассейна // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 156-159.
16. Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ермолович И.Г. Особенности развития карста в Кизеловском угольном бассейне // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2019. № 2(39). С. 326-337.
17. Кирюшина Е.В., Зеньков И.В., Чинь Л.Х., Юронен Ю.П., Агалакова А.В., Вокин В.Н., Черепанов Е.В., Маглинец Ю.А., Латынцев А.А., Раевич К.В., Лунев А.С., Павлова П.Л., Кузина Л.Н., Штреслер К.А. Исследование влияния последствий закрытия угольных шахт на экологическую систему Пермского края после отработки участков Кизеловского угольного бассейна // Уголь. 2024. № 10. С. 105-109.
18. Куприянов А.Н., Манаков Ю.А. Закономерности восстановления растительного покрова на отвалах Кузбасса // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 51-58.
19. Лобовиков А.О., Пугин К.Г., Устенко С.В. Эколого-экономические проблемы рекультивации террикона Кизеловского угольного бассейна // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 2. С. 74-88. <https://doi.org/10.15593/24111678/2016.02.06>
20. Максимович Н.Г., Березина О.А. Влияние ликвидированного Кизеловского угольного бассейна на химический состав речных вод // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: труды VII Всероссийского симпозиума с международным участием и XIV Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана / отв. ред. Г.А. Юргенсон. М., 2018. С. 96-102.
21. Максимович Н.Г., Березина О.А., Мещерякова О.Ю. Трансформация карстового суходола под воздействием кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 103-115.

22. Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Влияние карста на формирование экологической обстановки на территории Кизеловского угольного бассейна // Теория и практика современной карстологии и спелеологии: материалы Международной научно-практической конференции III Крымские карстологические чтения, Симферополь, 27 сентября 2021 года. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2021. С. 76-80.
23. Максимович Н.Г., Деменев А.Д., Березина О.А., Абдуллин Р.К. Особенности зарастания породных отвалов Кизеловского угольного бассейна // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 2. С. 67-71.
24. Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Пьянков С.В., Хайрулина Е.А. Эколого-геохимические проблемы угольных месторождений и пути их решения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы Международной научной конференции, посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко, Минск, 31 июля – 3 августа 2017 года / под ред. А.К. Карабанова. Минск: Институт природопользования НАН Беларуси, 2017. С. 291-294.
25. Максимович Н.Г., Мизев А.А., Березина О.А. Динамика изливов кислых шахтных вод угленосного массива после прекращения его разработки // Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Псков, 27–28 марта 2025 года / отв. ред. В.И. Осипов. М.: Геонифо, 2025. С. 187-191.
26. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. 287 с.
27. Мещурова Т.А. Оценка качества воды рек при анализе нагрузки сточных вод в Пермском крае // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 1. С. 27-32.
28. Митракова Н.В., Меньшикова Е.А., Хайрулина Е.А., Порошина Н.В. Диагностика кислых сульфатных почв в угледобывающем районе в таежной зоне // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2024. Т. 166. № 2. С. 324-341.
29. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Переображенская А.А. Свойства и классификация техногенных почв на территории Кизеловского угольного бассейна // Почвы и окружающая среда: Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 02–06 октября 2023 года / отв. ред. В.Н. Якименко. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2023. С. 147-150.
30. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Переображенская А.А., Порошина Н.В., Малышкина Е.Е., Яковleva E.C., Кобелев Н.А. Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернисто-угольных отвалах boreальной зоны // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9. № 4. С. 406-419. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206>
31. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Переображенская А.А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.31>
32. Овеснов С.А. Конспект флоры Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1997. 252 с.
33. Осинцева Н.А., Бурова Н.В., Жидкова Е.А. Особенности рекультивации отработанных территорий угольных разрезов в Кузбассе // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 9(123). С. 1-12.
34. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Затопление шахт и разрезов Челябинского угольного бассейна: последствия, проблемы и решения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 3. С. 167-174. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230317>
35. Фетисова Н.Ф. Оценка возможности применения пассивных методов для очистки шахтных вод с высоким содержанием металлов // Гидрогеология и карстоведение: Межвузовский сборник научных трудов. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 52-59.
36. Фетисова Н.Ф. Оценка поступления мышьяка в гидросферу Кизеловского угольного бассейна // Горное эхо. 2021. № 1(82). С. 49-53.
37. Фетисова Н.Ф. Расчет объема известняка для заполнения систем геохимической очистки шахтных вод на примере изливов Кизеловского угольного бассейна // Горное эхо. 2024. № 2(95). С. 3-8.
38. Фетисова Н.Ф., Фетисов В.В. Подходы к выбору систем очистки дренажных вод заброшенных горных выработок Кизеловского угольного бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 1. С. 109-124.
39. Чащин А.Н., Кондратьева М.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна // Географический вестник. 2019. № 2(49). С. 135-147.
40. Чмыхалова С.В., Гришин В.Ю., Пыталев И.А. Проблемы угледобывающей отрасли, жизненный цикл предприятий по добыче угля и последующая рекультивация нарушенных земель // Уголь. 2023. № 1. С. 70-75.
41. Чодураев Т.М., Шаршенова Д.С. Экологические последствия добычи угля: проблемы и решения (на примере Агулакского буровугольного разреза) // Актуальные вопросы образования и науки. 2022. № 1(73). С. 24-26.
42. Abdrakhmanova R.N., Orekhova N.N., Fischer H.B., Abdrakhmanov R.N., Nefedjev A.P., Kossov D.Y. Methods of sulfate removal from mining waste waters: overview // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2018. Vol. 16. Iss. 4. P. 21-29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-21-29>
43. Alekseenko V.A., Bech Ja., Alekseenko A.V., Shvydkaya N.V., Roca N. Environmental impact of disposal of coal mining wastes on soils and plants in Rostov Oblast, Russia // Journal of Geochemical Exploration. 2018. Vol. 184. Part B. P. 261-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.003>

44. Dziuba E., Buzmakov S., Khotyanovskaya Yu. Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. Iss. 12. P. 9135-9155 <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>
45. Bondaruk J., Janson E., Wysocka M., Chalupnik S. Identification of hazards for water environment in the Upper Silesian Coal Basin caused by the discharge of salt mine water containing particularly harmful substances and radionuclides // Journal of Sustainable Mining. 2015. Vol. 14. Iss. 4. P. 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.01.001>
46. Ma L., Lin L., Wang X., Zheng Z., Zhang X., Srivastava P., Gao X. Sulfate and pH drive microbial assembly and coexistence in hyporheic zone contaminated by acid coal mine drainage // Journal of Hydrology. 2025. Vol. 652. Article: 132703 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132703>
47. Redondo-Vega J.M., Melón-Nava A., Peña-Pérez S.A., Santos-González J., Gómez-Villar A., González-Gutiérrez R. Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): characteristics and geoecological significance // Research Square. 2021. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-714446/v1>
48. Skousen J., Zipper C.E., Rose A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment // Mine Water and the Environment. 2017. Vol. 36. Iss. 1. P. 133-153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
49. Thakur T.K., Patel D.K., Thakur A., Rathore R., Eripogu K.K., Dutta J., Kumar M. Land degradation and ecological restoration in central India: A geospatial and machine learning analysis of coal mining impacts // Trees, Forests and People. 2025. Vol. 21. Article: 100927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100927>
50. Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Chemical reactions and conditions of mineral formation at tailings storage facilities of the Russian Far East // Mining Science and Technology. 2021. Vol. 6. Iss. 3. P. 181-191. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-181-191>
- References**
1. Androkhyanov, V., Berlyakova, O., 2016. Sostoyanie lesnykh kultur i pochyennogo pokrova na rekul'tirovannom otvale ugol'nogo razreza [Condition of forest plantations and soil cover on a reclaimed coal mine dump]. *Sibirskii lesnoi zhurnal*. (2), pp. 20-29. (in Russian)
 2. Tartakovskiy, A. (ed.), 2012. *Atlas of Perm Region*. Perm: PSU. 124 p. (in Russian).
 3. Bachurin, B., 2018. Geochemical Aspects of Technogenesis in the Kizelovsky Coal Basin. *Mining Journal*, 6. pp. 40-45. <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2018.06.08> (in Russian)
 4. Belkin, P., Perevoshchikov, R. and Volkova, M., 2021. Redkie i redkozemel'nye elementy v porodnykh otvalakh Kizelovskogo ugol'nogo basseina [Rare and Rare Earth Elements in the Rock Dumps of the Kizelovsky Coal Basin]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. (4), pp. 288-293. (in Russian)
 5. Berdinskikh, S., Botalov, V., Romanov, A., Zaitsev, A., 2022. *Agrochemical Characteristics of the Upper Soil Layer on Coal Mine Dumps and the Effect of Clay Application on Their Natural Overgrowth (on the Example of the Kizelovsky Coal Basin)*. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in the Context of Anthropogenic Transformation of the Natural Environment: Proceedings of the All-Russian School-Seminar Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark*, 21-22 April 2022, Perm, Russia. Perm, Perm State National Research University, pp. 437-441. (in Russian).
 6. Voronchikhina, E., 2010. *Rekul'tivatsiya narushennykh landshaftov: teoriya, tekhnologii, regional'nye aspekty* [Reclamation of Disturbed Landscapes: Theory, Technologies, Regional Aspects]. Perm, RIO PSU publ. 163 p. (in Russian)
 7. Tetenyokin D., Kazanov V. (eds.), 2024. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'nosyr'evykh resursov RF v 2023 godu* [State Report on the Status and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2023]. Moscow, FGBU «VIMS». 710 p. (in Russian).
 8. Guleichuk, N. and Gomal, I., 2024. *Generalized Qualitative Assessment of the Impact of Coal Enterprises on the Hydroecosystem of Donbass*. In: Zorina, M. and Burlutsky, B. (eds.) *Innovative Prospects of Donbass: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*, 28–30 May 2024, Donetsk, Donetsk People's Republic. Donetsk, Donetsk National Technical University, pp. 122-128. (in Russian)
 9. Dzyuba, E., 2024. *Prirodno-tekhnogennoe geokhimicheskoe raionirovanie Permskogo kraja* [Natural-Technogenic Geochemical Zoning of the Perm Region]. *Geograficheskii vestnik*. (3), pp. 139-151. (in Russian)
 10. *Report on the state and environmental protection of the Perm Region in 2023*. Perm, 2023. 222 p. (in Russian)
 11. *Report on the state and environmental protection of the Perm Region in 2024*. Perm. 2024. 236 p. (in Russian)
 12. Zhukov, A. and Zhukova, E., 2022. Osobennosti suktsessii rastitel'nosti na primere rekul'tirovannogo otvala ugol'nogo razreza "Chernogorskii" [Features of Vegetation Succession on the Example of a Reclaimed Dump of the Chernogorsky Coal Mine]. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*. (3), pp. 114-124. (in Russian)
 13. Zenkov, I., Kiryushina, E., Pereira E. and Yuronen Yu., 2025. A study of the environmental challenges upon completion of underground coal mining operations in the Novgorod and Tver Regions. *Ugol.*, (1), pp. 109-112. (in Russian)
 14. Zenkov, I., Nefedov, N. and Morin, A., 2020. Tekhnologiya rekul'tivatsii zemel' pri razrabotke ugol'nykh mestorozhdenii v severnykh regionakh Rossii [Land reclamation technology in the development of coal deposits in the northern regions of Russia]. *Ugol.* (4), pp. 62-67. (in Russian)
 15. Karakuleva, A. and Kondratieva, M., 2018. Properties of embryos of coal mines dumps of the kizelovsky basin. *Anthropogenic Transformation of Nature*, (4), pp. 156-159. (in Russian)
 16. Kataev, V., Zolotarev, D. and Ermolovich, I., 2019. Osobennosti razvitiya karsta v Kizelovskom ugol'nom basseine [Features of karst development in the Kizelovsky coal basin]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*. (2), pp. 326-337. (in Russian)

17. Kiryushina E., Zenkov I., Trinh Le., Yuronen Yu., Agalakova A., Vokin V., Cherepanov E., Maglinets Yu., Latyntsev A., Raevich K., Lunev A., Pavlova P., Kuzina L. and Shtresler K., 2024. Research into the impact of coal mine closure on the environmental system of the perm krai upon completion of mining operations on sites in the kizelovsky coal basin. *Ugol*, (10), pp. 105-109. (in Russian)
18. Kupriyanov, A. and Manakov, Yu., 2016. Zakanomernosti vosstanovleniya rastitel'nogo pokrova na otvalakh Kuzbassa [Patterns of vegetation cover restoration on dumps of Kuzbass]. *Sibirskii lesnoi zhurnal*. (2), pp. 51-58. (in Russian)
19. Lobovikov, A., Pugin, K. and Ustenko, S., 2016. Ecological and economic problems of recultivation of mine waste dumps in the Kizelovsky coal basin. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. (2), pp. 74-88. <https://doi.org/10.15593/24111678/2016.02.06>
20. Maksimovich, N. and Berezina, O., 2018. *Vliyanie likvidirovannogo Kizelovskogo ugol'nogo basseina na khimicheskii sostav rechnykh vod* [Influence of the liquidated Kizelovsky coal basin on the chemical composition of river waters]. In: Yurgenson, G. (ed.) *Mineralogy and geochemistry of the landscape of mining territories. Rational nature management. Modern mineral formation: Proceedings of the VII All-Russian Symposium with International Participation and the XIV All-Russian Readings in Memory of Academician A.E. Fersman*. Moscow, pp. 96-102. (in Russian)
21. Maksimovich, N., Berezina, O. and Meshcheryakova, O., 2023. Transformatsiya kars-tovogo sukhodola pod vozdeistviem kislykh shakhtnykh vod Kizelovskogo ugol'nogo basseina [Transformation of a karst dry valley under the influence of acid mine waters of the Kizel coal basin]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. (4), pp. 103-115. (in Russian)
22. Maksimovich, N. and Meshcheryakova, O., 2021. *Vliyanie karsta na formirovanie ekologicheskoi obstanovki na territorii Kizelovskogo ugol'nogo basseina* [Influence of karst on the formation of the ecological situation in the territory of the Kizelovsky coal basin]. *Teoriya i praktika sovremennoi kartstologii i speleologii Theory and practice of modern karstology and speleology: materials of the International scientific and practical conference III Crimean karstological readings, 27 September 2021, Simferopol, Russia. Simferopol, Krymskii federal'nyi universitet im. V.I. Vernadskogo*, pp. 76-80. (in Russian)
23. Maksimovich, N., Demenev, A., Berezina, O. and Abdullin, R., 2023. Osobennosti zarastaniya porodnykh otvalov Kizelovskogo ugol'nogo basseina [Features of overgrowth of rock dumps of the Kizelovsky coal basin]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 27(2), pp. 67-71. (in Russian)
24. Maksimovich, N., Meshcheryakova, O., Pyankov, S. and Khairulina, E., 2017. *Ekologo-geokhimicheskie problemy ugol'nykh mestorozhdenii i puti ikh resheniya* [Ecological and geochemical problems of coal deposits and ways to solve them]. In: Karabanov, A. (ed.) *Geology and mineral resources of the West of the East European platform: problems of study and rational use: Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 215th anniversary of the birth of I. Domeiko, 31 July – 3 August 2017, Minsk, Belarus. Minsk: Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi*, pp. 291-294. (in Russian).
25. Maksimovich, N., Mizev, A. and Berezina, O., 2025. *Dinamika izlivov kislykh shakhtnykh vod uglenosnogo massiva posle prekrashcheniya ego razrabotki* [Dynamics of acid mine water discharges from a coal-bearing massif after the cessation of its development]. In: Osipov, V. (ed) *Sergeevskie chteniya. Soil massifs as a life-supporting resource of society: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, 27–28 March 2025, Pskov, Russia. Moscow: Geoinfo*, pp. 187-191. (in Russian)
26. Maksimovich, N. and Pyankov, S., 2018. *Kizelovskii ugol'nyi bassein: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [Kizelovsky Coal Basin: Environmental Problems and Solutions]. Perm, *Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet* publ. 287 p. (in Russian)
27. Meshchurova, T., 2023. Otsenka kachestva vody rek pri analize nagruzki stochnykh vod v Permskom krae [Assessment of river water quality when analyzing wastewater load in the Perm region]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*. (1), pp. 27-32. (in Russian)
28. Mitrakova, N., Menshikova, E., Khairulina, E. and Poroshina, N., 2024. *Diagnostika kislykh sul'fatnykh pochv v ugledobyvayushchem raione v taezhnoi zone* [Diagnoses of acid sulfate soils in a coal mining area in the taiga zone]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki*. 166(2), pp. 324-341. (in Russian)
29. Mitrakova, N., Khairulina, E. and Perevoshchikova, A., 2023. *Svoistva i klassifikatsiya tekhnogenennykh pochv na territorii Kizelovskogo ugol'nogo basseina* [Properties and classification of technogenic soils in the territory of the Kizelovsky coal basin]. In: Yakimenko, V. (ed.) *Soils and the environment: All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, 2–6 October 2023, Novosibirsk, Russia. Novosibirsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS*, pp. 147-150. (in Russian)
30. Mitrakova, N., Khairulina, E., Perevoshchikova, A., Malyshkina, E., Yakovleva, E., and Kobelev, N., 2024. Chemical and ecological properties of soils and NDVI index on reclaimed sulfur-coal dumps of the boreal zone. *Mining Science and Technology*, 9(4), pp. 406-419. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206> (in Russian)
31. Mitrakova, N., Khairulina, E., Blinov, S. and Perevoshchikova, A., 2023. Effectiveness of reclamation of acid sulfate soils in coal mining areas. *Zapiski Gornogo Instituta*, 260, pp. 266-278. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.31> (in Russian)
32. Ovesnov, S., 1997. *Konspekt flory Permskoi oblasti* [Synopsis of the flora of the Perm Region]. Perm, Perm University publ. 252 p. (in Russian)
33. Osintseva, N., Burova, N. and Zhidkova, E., 2022. Osobennosti rekul'tivatsii otrabotannykh territorii ugol'nykh razrezov v Kuzbasse [Features of reclamation of depleted coal mine areas in Kuzbass]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. (9), pp. 1-12. (in Russian)
34. Rybnikova, L., Rybnikov, P. and Smirnov, A., 2023. *Zatoplenie shakht i razrezov Chelyabinskogo ugol'nogo basseina: posledstviya, problemy i resheniya* [Flooding of mines and open pits of the Chelyabinsk coal

- basin: consequences, problems and solutions]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopаемых.* (3), pp. 167-174. <https://doi.org/10.1134/S1062739123030171> (in Russian)
35. Fetisova, N., 2023. *Otsenka vozmozhnosti primeneniya passivnykh metodov dlya ochistki shakhynykh vod s vysokim soderzhaniem metallov* [Assessment of the possibility of using passive methods for the treatment of mine waters with high metal content]. In: *Hydrogeology and karstology: Interuniversity collection of scientific papers. Perm, PSU*, pp. 52-59. (in Russian)
36. Fetisova, N., 2021. Otsenka postupleniya mysh'yaka v gidrosferu Kizelovskogo ugor'nogo basseina [Assessment of arsenic input into the hydrosphere of the Kizelovsky coal basin]. *Gornoe ekho.* (1), pp. 49-53. (in Russian)
37. Fetisova, N., 2024. Raschet ob'ema izvestnyaka dlya zapolneniya sistem geokhimicheskoi ochistki shakhynykh vod na primere izlivov Kizelovskogo ugor'nogo basseina [Calculation of limestone volume for filling geochemical mine water treatment systems on the example of discharges from the Kizelovsky coal basin]. *Gornoe ekho.* (2), pp. 3-8. (in Russian)
38. Fetisova, N. and Fetisov V., 2024. Approaches to the selection of drainage water treatment systems for abandoned mine workings of the Kizelovsky coal basin. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, (1). pp. 109-124. (in Russian)
39. Chashchin, A. and Kondratyeva, M., 2019. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya otsenki tempov samozarastaniya ugor'nykh otvalov Kizelovskogo basseina [The use of remote sensing data to assess the rate of self-overgrowth of coal mining dumps in the Kizel basin]. *Geograficheskii vestnik.* (2), pp. 135-147. (in Russian)
40. Chmykhalova, S., Grishin, V. and Pytalev, I., 2023. Problemy ugledobyyayushchey otrassli, zhiznennyyi tsikl predpriyatiy po dobychi ugor'ya i posleduyushchaya rekul'tivatsiya narushennykh zemel' [Problems of the coal mining industry, life cycle of coal mining enterprises and subsequent reclamation of disturbed lands]. *Ugol.* (1), pp. 70-75. (in Russian)
41. Choduraev, T. and Sharshenova, D., 2022. Ekologicheskie posledstviya dobychi ugor'ya: problemy i resheniya (na primere Agulakskogo burougol'nogo razreza) [Environmental consequences of coal mining: problems and solutions (on the example of the Agulak brown coal mine)]. *Aktual'nye voprosy obrazovaniya i nauki.* (1), pp. 24-26. (in Russian)
42. Abdurakhmanova, R., Orekhova, N., Fischer, H., Abdurakhmanov, R., Nefedjev, A., and Kossov D., 2018. Methods of sulfate removal from mining waste waters: overview. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University,* 16(4), pp. 21-29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-4-21-29>
43. Alekseenko, V., Bech, Ja., Alekseenko, A., Shvydkaya, N., and Roca, N., 2018. Environmental impact of disposal of coal mining wastes on soils and plants in Rostov Oblast, Russia. *Journal of Geochemical Exploration,* 184 (Part B), pp. 261-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.003>
44. Dziuba, E., Buzmakov, S. and Khotyanovskaya, Yu., 2023. Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies. *Environmental Geochemistry and Health,* 45(12), pp. 9135-915. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>
45. Bondaruk, J., Janson, E., Wysocka, M. and Chałupnik, S., 2015. Identification of hazards for water environment in the Upper Silesian Coal Basin caused by the discharge of salt mine water containing particularly harmful substances and radionuclides. *Journal of Sustainable Mining,* 14(4), pp. 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.01.001>
46. Ma, L., Lin, L., Wang, X., Zheng, Z., Zhang, X., Srivastava, P. and Gao, X., 2025. Sulfate and pH drive microbial assembly and coexistence in hyporheic zone contaminated by acid coal mine drainage. *Journal of Hydrology,* 652, Article: 132703.
47. Redondo-Vega, J., Melón-Nava, A., Peña-Pérez, S., Santos-González, J., Gómez-Villar, A. and González-Gutiérrez, R., 2021. Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): characteristics and geoecological significance. *Research Square,* <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-714446/v1>
48. Skousen, J., Zipper, C., Rose, A., Ziemkiewicz, P., Nairn, McDonald, L., and Kleinmann, R., 2017. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water and the Environment,* 36(1), pp. 133-153. <https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>
49. Thakur, T., Patel, D., Thakur, A., Rathore, R., Eriopogu, K., Dutta, J., and Kumar, M., 2025. Land degradation and ecological restoration in central India: A geospatial and machine learning analysis of coal mining impacts. *Trees, Forests and People,* 21, Article: 100927. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100927>
50. Zvereva, V., Frolov, K., and Lysenko, A., 2021. Chemical reactions and conditions of mineral formation at tailings storage facilities of the Russian Far East. *Mining Science and Technology,* 6(3), pp. 181-191. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-181-191>

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 14.11.2025.

The article was submitted 21.08.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 14.11.2025.