

ДИНАМИКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАССИВА И ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К СИСТЕМЕ ПРЕДИКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (НА ПРИМЕРЕ УНАЛЬСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА)

В.А. Фоменко¹, Д.Ю. Рудницкий², Д.А. Плахотин¹, И.И. Башмашников¹, Г.С. Ковалев³

¹ Южный федеральный университет, филиал Южного федерального университета
в г. Геленджике, Геленджик, Россия, e-mail: plakhotin@sfnu.ru

² АО «Южное научно-производственное объединение
по морским геологоразведочным работам», Геленджик, Россия

³ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, РСО–Алания, Россия

Аннотация: По результатам экспедиций 2022–2026 гг. на Унальское хвостохранилище (Республика Северная Осетия–Алания) установлено, что рекультивированный техногенный массив эволюционирует с интенсивностью, намного превышающей фоновые геологические процессы. По результатам ежегодного нивелирования зафиксированы просадки до 2,4 м с 2019 г., до 50 см/год в центре объекта; отмечены трещины с глубиной раскрытия отдельных разрывов более 5 м, локальные вспучивания, приуроченные к зонам инфильтрации осадков. В трещинах объемная активность радона достигает 5000 Бк/м³. В ходе исследований апробирован экспресс-метод оценки засоленности по электропроводности почвы и воды р. Ардон, полученные данные коррелируют с химическими анализами на тяжелые и щелочные металлы; выявлены участки разгрузки минерализованных вод в реку. Сейсмонаблюдения показали изменение спектра микросейсмического фона после землетрясения $M = 4,4$ (ноябрь 2024 г.), что говорит о снижении эффективной жесткости обводненного массива. Предложен новый комплексный подход, объединяющий деформационные, геохимические, радоновые и сейсмические параметры. Обоснован переход к стационарному предиктивному контролю вместо дискретных замеров – для прогноза опасных процессов и своевременных защитных решений. Подчеркнута глобальная значимость мониторинга законсервированных хвостохранилищ в контексте предотвращения техногенных катастроф.

Ключевые слова: хвостохранилище, деформационные процессы, техногенный массив, предиктивный контроль, геоэкологический мониторинг, радоновая съемка, минерализованные воды, тяжелые металлы, сейсмическая опасность, рекультивация.

Благодарность: Исследования выполнены в Южном федеральном университете за счет средств Российского научного фонда (проект № РНФ/23-37-ГЛ, № 23-77-00015).

Для цитирования: Фоменко В. А., Рудницкий Д. Ю., Плахотин Д. А., Башмашников И. И., Ковалев Г. С. Динамика геоэкологического состояния техногенного массива и обоснование перехода к системе предиктивного контроля (на примере Унальского хвостохранилища) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 95–105. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_95.

Dynamics of geoecological condition of manmade massif and substantiation of transition to predictive control: A case-study of the Unal tailings dam

V.A. Fomenko¹, D.Y. Rudnitsky², D.A. Plakhotin¹, I.I. Bashmashnikov¹, G.S. Kovalev³

¹ Southern Federal University, branch of the Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: plakhotin@sfedu.ru

² Joint-Stock Company «Southern Scientific & Production Association for Marine Geological Explorations», Gelendzhik, Russia

³ North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, North Ossetia–Alania, Russia

Abstract: From the results of the 2022–2026 expedition to the Unal tailings dam, Republic of North Ossetia–Alania, it is found that the reclaimed manmade massif evolves at the rate much higher than the background geological processes have. The annual leveling recorded subsidence values to 2.4 m since 2019 and to 50 cm/year in the center of the object; fractures with an opening depth to 5 m were detected, and local heavings were observed nearby the zones of rainfall infiltration. In the fractures, the volumetric activity of radon reaches 5000 Bq/m³. The research involved testing of a rapid test method of salinity assessment by electrical conductivity of soil and the Ardon river water. The obtained data correlate with the chemical analyses of heavy alkaline metals. The sites of discharge of the mineralized water in the river are revealed. The seismic observations show the change in the spectrum of the microseismic background after an M=4.4 earthquake in November, 2024, which tells about a decrease in the effective hardness of the watered massif. A new integrated approach is proposed, which embraces the deformation, geochemical, radon and seismic parameters. Transition to the stationary predictive control instead of discrete measurements is substantiated for the prediction of hazardous processes and prompt protective decision-making. The global significance of monitoring of suspended tailings dams in the context of the induced emergency prevention is emphasized.

Key words: tailings dam, deformation processes, manmade massif, predictive control, geoecological monitoring, radon survey, mineralized water, heavy metals, seismic hazard, reclamation.

Acknowledgements: The study was carried out at the Southern Federal University and supported by the Russian Science Foundation, Projects Nos. RNF/23-37-GL and 23-77-00015.

For citation: Fomenko V. A., Rudnitsky D. Y., Plakhotin D. A., Bashmashnikov I. I., Kovalev G. S. Dynamics of geoecological condition of manmade massif and substantiation of transition to predictive control: A case-study of the Unal tailings dam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):95-105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_95.

Введение

Насыпные и намывные техногенные массивы (хвостохранилища, шламонакопители) представляют потенциальную угрозу экологической безопасности даже после окончания рекультивации. В случае, если высота плотины превышает 35 м, объект относят к особо опасным, так как разрушение может привести к техногенным катастрофам [1]. Особого

внимания заслуживают хвостохранилища, расположенные в горных условиях и содержащие значительные объемы хвостовых отложений разных классов опасности [2, 3]; они находятся на наклонных участках и примыкают дамбой к горным рекам.

Мониторинг данных объектов следует выделить в отдельное направление исследований [4].

В горных регионах проблема оценки состояния рекультивированных хвостохранилищ становится все острее по причине активного развития рекреационных территорий вдоль р. Терек вплоть до Каспия. Унальское хвостохранилище находится вблизи жилых и социально значимых объектов, поэтому достоверная оценка его состояния и прогноз дальнейших изменений критически важны.

Мировая практика показывает, что аварии на хвостохранилищах относятся к числу наиболее масштабных техногенных катастроф. По данным международных исследований, за последние десятилетия зафиксировано более 350 серьезных аварий на хвостохранилищах по всему миру [5–8]. При этом значительная часть этих объектов была выведена из эксплуатации и формально рекультивирована, однако продолжает представлять скрытую угрозу. В связи с этим международное сообщество все больше внимания уделяет проблеме долгосрочного мониторинга законсервированных хвостохранилищ, что нашло отражение в глобальных инициативах, таких как «Принципы безопасного управления хвостохранилищами» (Global Tailings Review, 2020) и «Цели устойчивого развития ООН» (ЦУР 6-12). Разработка эффективных систем предиктивного контроля для таких объектов становится одной из приоритетных задач мировой геоэкологии [9–11].

Зарубежные исследования в области мониторинга хвостохранилищ в последние годы все чаще обращаются к комплексным подходам, сочетающим геодезические, геофизические, геохимические и другие методы [5, 6]. Особое внимание уделяется применению методов дистанционного зондирования [7] и машинного обучения для прогнозирования деформационных процессов [8, 12, 13]. В российской практике комплексные многолетние наблюдения за рекульти-

рованными объектами в горных условиях остаются единичными, что обусловлено как организационными, так и методическими сложностями [14–16].

Цель настоящей работы — на основе результатов четырехлетних экспедиционных исследований (2022–2026 гг.) на Унальском хвостохранилище разработать и обосновать необходимость перехода от дискретных наблюдений к системе стационарного предиктивного контроля, способного обеспечить долгосрочную экологическую и техногенную безопасность объекта. Задачи исследования включали: количественную оценку динамики деформационных процессов; выявление геохимических и радоновых аномалий; анализ влияния сейсмических событий на состояние техногенного массива; апробацию экспресс-методов оценки засоленности почвогрунта применительно к геоэкологическому состоянию объекта; обоснование структурных элементов системы предиктивного контроля.

Материалы и методы

Экспедиционные работы проводились весной 2026 г. В ходе исследований был выполнен следующий комплекс наблюдений по четырем направлениям исследований.

1. Теодолитная съемка (нивелирование поверхности). Выполнено три высокоточных нивелирования II класса точности с использованием теодолита. Съемка проведена по системе реперов, заложенных в 2022 г. Создана цифровая модель рельефа (ЦМР) и построены карты изолиний проседаний. Данные интегрированы с результатами предыдущих измерений (2022–2025 гг.) для оценки динамики деформаций. На мерном участке в виде 20 контрольных реперов, расположенных через 1 м вблизи края дамбы, проведена оценка стабильности по линии предполагаемого ее растяжения.

2. Радоновая съемка. Измерения объемной активности радона выполнялись в раскрывшихся трещинах техногенного массива с использованием радиометра «Альфарад плюс Р». Зонд для забора воздуха погружался на глубину до 2 м. Измерения проводились с учетом влияния метеорологических параметров, фиксируемых метеостанцией «Сокол-М1».

3. Измерение электропроводности почвы и воды. Апробирован разработанный экспресс-метод оценки засоленности поверхности почвогрунта и минерализации сточных вод хвостохранилища с использованием кондуктометра собственной конструкции, штатно предназначенного для оценки электропроводности воды и почв. Измерения выполнены как выше, так и ниже хвостохранилища [17].

4. Сейсмический мониторинг. Проведен пассивный сейсмический мониторинг поверхности тела хвостохранилища с использованием сейсмостанции DR 4040. Выполнен анализ последствий землетрясения магнитудой 4,4, произо-

шедшего 27 ноября 2024 г., с эпицентром в 40 км от объекта исследований. Обработка геодезических данных выполнена в среде AutoCAD и специализированном программном обеспечении для построения цифровых моделей рельефа. Статистический анализ геохимических данных проведен с использованием пакетов Python (Jupyter Notebook) и R. Для прогнозного моделирования использованы алгоритмы машинного обучения: множественная линейная регрессия, Random Forest и LSTM.

Результаты исследований

Многократное нивелирование показало, что поверхность хвостохранилища претерпевает значительные изменения. Максимальное проседание наблюдается в нижней центральной (по течению реки) части рекультивированного хвостохранилища. По полученным данным, с момента рекультивации (декабрь 2019 г.) максимальная просадка достигает примерно 2,4 м. Левая часть борта хвостохранилища (вверх по течению) существенных изменений не претерпевает (рис. 1).

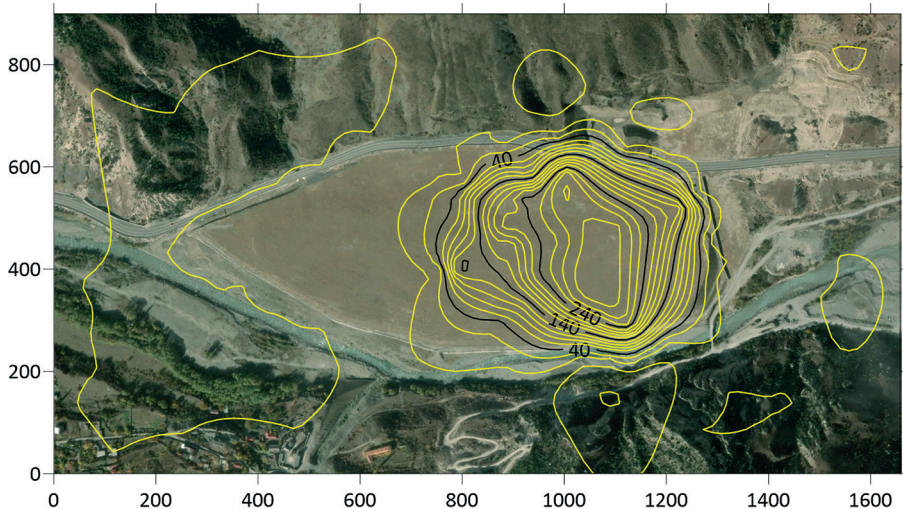


Рис. 1. Карта изолиний поверхности Унальского хвостохранилища по данным нивелирования (май 2026 г.) (наложенная на космический снимок)

Fig. 1. Map of the isolines of the surface of the Unalsky tailing dump according to leveling data (May 2026) (superimposed on the satellite image)

Динамика деформаций характеризуется формированием депрессионной воронки («цирка») в центральной части с градиентами до 50 см/год, что на порядок превышает естественные скорости современных геологических процессов в регионе. Установлена пространственная связь зон максимальных проседаний с областями инфильтрации атмосферных осадков.

При геотехническом мониторинге обнаружены участки с положительным возвышением (вспучиванием), что объясняется проникновением влаги в раскрывшиеся трещины и последующим набуханием глинистых минералов, слагающих отдельные прослои. Сезонные увлажнения проникающей влагой приводят к локальным поднятиям поверхности с перестройкой напряженно-деформируемого состояния тела хвостохранилища и дальнейшим развитием процессов трещинообразования, что указывает на значительные объемы осадков, проникающих сквозь трещины внутрь тела хвостохранилища. Отдельные трещины имеют наблюдаемую глубину до 5 м при длине раскрытия до 10 м. Заме-

чены новые формирующиеся участки трещинообразования, что указывает на продолжение процессов перестройки уровней поверхности (рис. 2). Выявлена новая зона разрыва поверхности (на снимке не указана) с высолами протяженностью более 20 м вблизи автодороги.

Заложенный в 2024 г. контрольный участок в виде мерной линии контрольных из 20 реперов через 1 м, расположенных ближе к краю дамбы, показал относительную стабильность в пределах погрешности измерений по линии предполагаемого сползания к реке.

Измерения радона проводились в раскрывшихся трещинах с погружением зонда для забора воздуха на глубину до 2 м в условиях сильного горно-долинного ветра (скорость в порывах достигала 12 м/с). Поверхность трещин укрывалась палаточной тканью. Показания радиометра составили в среднем около 5000 Бк/м³.

Основная доля засоления почвогрунта рекультивированной поверхности хвостохранилища связана с инфильтрацией растворимых солей флюидов на поверхность, в том числе продуктов



Рис. 2. Схема распределения трещин поверхности Унальского хвостохранилища (май 2026 г.) (наложенная на космический снимок)

Fig. 2. The distribution of cracks on the surface of the Unalsky tailings reservoir (May 2026) (superimposed on the satellite image)



Рис. 3. Схема данных замеров электропроводности почвогрунта Унальского хвостохранилища и воды в реке Ардон (май 2026 г.), наложенная на космический снимок

Fig. 3. Data diagram of measurements of electrical conductivity of the soil of the Unalsky tailings dam and water in the Ardon River (May 2026) (superimposed on satellite image)

гипергенеза захороненных отходов измельченных горных пород. Основную экологическую проблему создают соли тяжелых и щелочных металлов, поступающие на поверхность и затем дренирующие в подземные водоотводы с вероятной разгрузкой их в р. Ардон. Количество солей неравномерно распределено по поверхности и зависит от многих факторов, таких как мощность, наклон и состав рекультивирующего слоя, увлажненность, климатические особенности ущелья [18, 19].

Проведенные экспериментальные исследования по измерению электропроводности почвогрунта и минерализованных вод хвостохранилища показали, что полученные значения хорошо коррелируют с ранее выполненными химическими анализами проб на содержание тяжелых и щелочных металлов [20–22].

Измерения в трех точках отбора проб ниже по течению р. Ардон показывают, что электропроводность в береговой части возрастает от фоновых значений до максимальных в самой нижней точке (рис. 3). Это свидетельствует о том, что поступающие с поверхности воды с растворенными солями разгружаются в р. Ардон и частично концентрируются. Процесс накопления солей в аллювии береговой части возрастает, достигая больших величин ниже в условно застойной левобережной части р. Ардон.

Разработанная конструкция кондуктометра для всесезонного экспресс-метода измерений электропроводности почвогрунта и воды (подана заявка на изобретение) апробирована в горных условиях как метод измерения количественных характеристик электропроводности слежавшихся почв и воды горных рек и может являться альтернативой отбору проб и химическому анализу для оценки экологического загрязнения (засоления) в зоне влияния хвостохрани-

лищ. Пассивный сейсмомониторинг зафиксировал изменение спектра и замедленное затухание колебаний от автотрассы после землетрясения 27.11.2024 ($M = 4,4$). Это говорит о снижении жесткости и демпфирования массива, скорее всего, из-за роста порового давления в обводненных зонах (эффект разжижения). Даже умеренные удаленные толчки способны менять напряженное состояние техногенного массива тела хвостохранилища, повышая его уязвимость к следующим сейсмическим воздействиям — важный фактор при оценке риска.

Обсуждение результатов

Несмотря на рекультивацию, Унальское хвостохранилище остается активной природно-технической системой. Скорость просадок (50 см/год) на порядок выше естественных геологических процессов, что связано с водным и сейсмическим режимами. Зоны максимальных деформаций и локальных вспучиваний приурочены к участкам инфильтрации осадков — проникающая влага вызывает уплотнение, суффозию и растрескивание цементирующих солей.

Радоновые аномалии (до 5000 Бк/м³) в трещинах подтверждают, что разрывные нарушения служат каналами глубинной газовой миграции, что создает экологический риск при рекреационном освоении. Предложенный метод мониторинга радона с поправкой на метеопараметры повышает достоверность оценок и применим на других объектах.

Измерения электропроводности выявили рост засоления в береговой зоне ниже хвостохранилища — грунтовые воды, обогащенные солями тяжелых и щелочных металлов, разгружаются в р. Ардон, угрожая водным экосистемам и качеству воды.

Сейсмические воздействия на тело хвостохранилища (землетрясение $M = 4,4$, ноябрь 2024 г.) не вызвали значи-

тельных деформаций поверхности, но изменили спектр микросейсмического фона — замедленное затухание сигналов указывает на снижение жесткости массива, и, возможно, послужили одной из причин возникновения трещин рекультивированной поверхности.

Авторы статьи предлагают осуществить переход к предиктивному контролю, который предполагает непрерывный сбор данных (деформации, сейсмика, метеоданные, радон), автоматизированную обработку с машинным обучением, математическое моделирование эволюции массива, прогноз критических состояний и своевременное информирование о защитных мерах.

Заключение

По итогам экспедиций 2022 — 2026 гг. установлено:

1) деформации продолжаются: просадки с 2019 г. достигли 2,4 м, среднегодовые скорости в центре — 50 см/год. Трещины раскрываются более 5 м, появляются новые зоны разрывов — процессы консолидации далеки от завершения и требуют постоянного контроля;

2) в трещинах измерения радона составляют 5000 Бк/м³; разработанный метод мониторинга с учетом метеопараметров повышает достоверность. Учи-

тывая канцерогенность радона и возможное рекреационное использование территории, проблема требует внимания;

3) экспресс-метод по электропроводности подтвердил миграцию солей тяжелых и щелочных металлов в р. Ардон — рост электропроводности в береговой зоне свидетельствует о разгрузке грунтовых вод. Метод рекомендован для оперативной оценки засоленности в горных условиях;

4) полученные данные обосновывают переход к стационарному предиктивному контролю с непрерывным мониторингом, автоматизированной обработкой и прогнозным моделированием.

Дальнейшие работы в рамках реализуемого проекта РНФ должны быть направлены на создание антивандального геофизического полигона с системой реального времени (датчики деформаций, порового давления, сейсмики, радона), цифровое моделирование эволюции массива при разных сценариях, разработку нормативной базы для предиктивного контроля на закрытых объектах и международное сотрудничество для глобальной системы раннего предупреждения техногенных катастроф на выведенных из эксплуатации объектах горно-обогательной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Башмашников И. И., Турметова Г. Ж. Оценка эволюции деформационных процессов в техногенном массиве рекультивированного объекта горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 7. — С. 90 — 101. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_90.
2. Клюев Р. В. Геоэкологические аспекты и природоохранные технологии при цианидном выщелачивании на золотоизвлекательных фабриках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 3. — С. 5 — 17. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_5.
3. Серянина А. В., Овчинникова Т. И., Тертычная С. В. К вопросу об экологической безопасности в металлургической промышленности // Безопасность труда в промышленности. — 2024. — № 8. — С. 23 — 28. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.
4. Фоменко В. А., Маковозова З. Э., Соколов А. А., Аксенова М. А., Ковалев Г. С. Анализ водного режима и эволюции массива грунтов рекультивированного объекта горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 5. — С. 118 — 129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.

5. Rico M., Benito G., Salgueiro A. R., Díez-Herrero A., Pereira H. G. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context // *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 152, no. 2, pp. 846–852.
6. Kossoff D., Dubbin W. E., Alfredsson M., Edwards S. J., Macklin M. G., Hudson-Edwards K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // *Applied Geochemistry*. 2014, vol. 51, pp. 229–245.
7. Chen J., Li K., Chang K. J., Sofia G., Tarolli P. Open-pit mining geomorphic feature characterisation // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015, vol. 42, pp. 76–86.
8. Liu Z., Cao W., Zhang C., Li H., Zhang Y. Machine learning-based prediction of tailings dam stability // *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 6627964.
9. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
10. Vurdova N. G., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V., Kulikova A. A., Meshchanova V. D., Vurdov P. Y., Birman Y. A., Krotova M. V., Yakusheva A. A. An innovative technical solution for the extraction and disposal of hazardous industrial waste for landfill decommissioning // *Environments*. 2026, vol. 13, no. 5, article 272. DOI: 10.3390/environments13050272.
11. Земляной М. А., Габараев О. З., Довгаль В. В., Сахнов А. В. Геомеханическое районирование лежалых хвостов урупского хвостохранилища как основа дифференцированной переработки и закладки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 157–176. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-157-176.
12. Шепелев И. И., Пиляева О. В., Соколов А. А., Адам А. М., Немеров А. М. Разработка инженерных решений по очистке промышленных сточных вод глиноземного производства // *Экология и промышленность России*. — 2025. — Т. 29. — № 12. — С. 10–14.
13. Svobodova K., Barták V., Hendrychová M. Visiting mine reclamation: How field experience shapes perceptions of mining // *Ambio*. 2025, vol. 54, pp. 72–85. DOI: 10.1007/s13280-024-02055-y.
14. Basu D., Mishra S. Mine reclamation practices and effects of stakeholder perception — A case study of Saoner mines, Maharashtra, India // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2024, vol. 71, article 62. DOI: 10.1186/s44147-024-00393-y.
15. Dusengemungu L., Mubemba B., Gwanama C. Evaluation of heavy metal contamination in copper mine tailing soils of Kitwe and Mufulira, Zambia, for reclamation prospects // *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 11283. DOI: 10.1038/s41598-022-15458-2.
16. Mukumba C. P., Sishekanu M., Marais L. Mine waste disasters on the Zambian Copperbelt: Regulatory and community concerns // *Environmental Management*. 2026, vol. 76, article 143. DOI: 10.1007/s00267-026-02444-x.
17. Wang S., Guo J., Yu Y., Shi P., Zhang H. Quality evaluation of land reclamation in mining area based on remote sensing // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2023. vol. 10, article 43. DOI: 10.1007/s40789-023-00601-9.
18. Ali M. A. H., Qian W., Rabeiy R., Saleem H. A., Mohamed A. S., Muhammad A. U., Shebl A. Environmental impact assessment of leachate from mining tailings using electrical resistivity imaging // *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 23671. DOI: 10.1038/s41598-025-08030-1.
19. Ledesma J., Neilson J. W., Maier R. M., Babst-Kostecka A., Rasmussen C. Effects of stockpiling on topsoil biogeochemistry for semiarid mine reclamation // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2025, vol. 42, pp. 15–26. DOI: 10.1007/s42461-024-01164-2.
20. Mohuba S. C., Moshipya P. M., Abiye T. A., Nhleko S., Korir I. Radionuclide distribution and exposure doses in mine tailing dumps from the west rand gold mining region of the Gauteng province, South Africa // *Discover Environment*. 2025, vol. 3, article 213. DOI: 10.1007/s44274-025-00430-4.
21. Sahakyan S., Yedoyan T., Khachatryan E., Hakobyan M., Gevorgyan A. Reclamation of saline-sodic heavy-textured soils using a novel electro-reclamation method // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2026, vol. 25, article 35. DOI: 10.1007/s44447-026-00142-y.
22. Girón-Guzmán I., Sánchez-Alberola S., Cuevas-Ferrando E., Falcó I., Díaz-Reolid A., Puchades-Colera P., Ballesteros S., Pérez-Cataluña A., Coll J. M., Núñez E., Fabra M. J., López-Rubio A., Sánchez G. Longitudinal study on the multifactorial public health risks associated with sewage reclamation // *Clean Water*. 2024, vol. 7, article 72. DOI: 10.1038/s41545-024-00365-y. **WAS**

REFERENCES

1. Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Bashmashnikov I. I., Turmetova G. Z. Evolution of deformations inside reclaimed man-made object of mining practice. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 7, pp. 90–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_90.
2. Klyuev R. V. Geocological aspects and environmental technologies in gold cyanidation at gold recovery plants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 3, pp. 5–17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_3_0_5.
3. Seryanina A. V., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V. On the issue of environmental safety in the metallurgical industry. *Occupational Safety in Industry.* 2024, no. 8, pp. 23–28. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-8-23-28.
4. Fomenko V. A., Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Aksenova M. A., Kovalev G. S. Analysis of water conditions and evolution of rock mass at a mining industry object after reclamation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 5, pp. 118–129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_118.
5. Rico M., Benito G., Salgueiro A. R., Díez-Herrero A., Pereira H. G. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials.* 2008, vol. 152, no. 2, pp. 846–852.
6. Kossoff D., Dubbin W. E., Alfredsson M., Edwards S. J., Macklin M. G., Hudson-Edwards K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry.* 2014, vol. 51, pp. 229–245.
7. Chen J., Li K., Chang K. J., Sofia G., Tarolli P. Open-pit mining geomorphic feature characterisation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2015, vol. 42, pp. 76–86.
8. Liu Z., Cao W., Zhang C., Li H., Zhang Y. Machine learning-based prediction of tailings dam stability. *Advances in Civil Engineering.* 2021, vol. 2021, article 6627964.
9. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580–588. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
10. Vurdova N. G., Ovchinnikova T. I., Tertychnaya S. V., Kulikova A. A., Meshchanova V. D., Vurdov P. Y., Birman Y. A., Krotova M. V., Yakusheva A. A. An innovative technical solution for the extraction and disposal of hazardous industrial waste for landfill decommissioning. *Environments.* 2026, vol. 13, no. 5, article 272. DOI: 10.3390/environments13050272.
11. Zemlyanoy M. A., Gabaraev O. Z., Dovgal V. V., Sakhnov A. V. Geomechanical zoning of aged tailings at the urup tailings storage facility as a basis for differentiated processing and backfilling. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2026, vol. 18, no. 1, pp. 157–176. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-157-176.
12. Shepelev I. I., Pilyaeva O. V., Sokolov A. A., Adam A. M., Nemerov A. M. Development of engineering solutions for industrial wastewater treatment of alumina production. *Ecology and industry of Russia.* 2025, vol. 29, no. 12, pp. 10–14. [In Russ].
13. Svobodova K., Barták V., Hendrychová M. Visiting mine reclamation: How field experience shapes perceptions of mining. *Ambio.* 2025, vol. 54, pp. 72–85. DOI: 10.1007/s13280-024-02055-y.
14. Basu D., Mishra S. Mine reclamation practices and effects of stakeholder perception – A case study of Saoner mines, Maharashtra, India. *Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2024, vol. 71, article 62. DOI: 10.1186/s44147-024-00393-y.
15. Dusengemungu L., Mubemba B., Gwanama C. Evaluation of heavy metal contamination in copper mine tailing soils of Kitwe and Mufulira, Zambia, for reclamation prospects. *Scientific Reports.* 2022, vol. 12, article 11283. DOI: 10.1038/s41598-022-15458-2.
16. Mukumba C. P., Sishekanu M., Marais L. Mine waste disasters on the Zambian Copperbelt: Regulatory and community concerns. *Environmental Management.* 2026, vol. 76, article 143. DOI: 10.1007/s00267-026-02444-x.
17. Wang S., Guo J., Yu Y., Shi P., Zhang H. Quality evaluation of land reclamation in mining area based on remote sensing. *International Journal of Coal Science & Technology.* 2023, vol. 10, article 43. DOI: 10.1007/s40789-023-00601-9.
18. Ali M. A. H., Qian W., Rabeiy R., Saleem H. A., Mohamed A. S., Muhammad A. U., Shebl A. Environmental impact assessment of leachate from mining tailings using electrical resistivity imaging. *Scientific Reports.* 2025, vol. 15, article 23671. DOI: 10.1038/s41598-025-08030-1.
19. Ledesma J., Neilson J. W., Maier R. M., Babst-Kostecka A., Rasmussen C. Effects of stockpiling on topsoil biogeochemistry for semiarid mine reclamation. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2025, vol. 42, pp. 15–26. DOI: 10.1007/s42461-024-01164-2.

20. Mohuba S. C., Moshipyra P. M., Abiye T. A., Nhleko S., Korir I. Radionuclide distribution and exposure doses in mine tailing dumps from the west rand gold mining region of the Gauteng province, South Africa. *Discover Environment*. 2025, vol. 3, article 213. DOI: 10.1007/s44274-025-00430-4.

21. Sahakyan S., Yedoyan T., Khachatryan E., Hakobyan M., Gevorgyan A. Reclamation of saline-sodic heavy-textured soils using a novel electro-reclamation method. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2026, vol. 25, article 35. DOI: 10.1007/s44447-026-00142-y.

22. Girón-Guzmán I., Sánchez-Alberola S., Cuevas-Ferrando E., Falcó I., Díaz-Reolid A., Puchades-Colera P., Ballesteros S., Pérez-Cataluña A., Coll J. M., Núñez E., Fabra M. J., López-Rubio A., Sánchez G. Longitudinal study on the multifactorial public health risks associated with sewage reclamation. *Clean Water*. 2024, vol. 7, article 72. DOI: 10.1038/s41545-024-00365-y.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фоменко Владимир Александрович¹ — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: vafomenko@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

Рудницкий Денис Юрьевич — управляющий директор, АО «Южное научно-производственное объединение по морским геологоразведочным работам», e-mail: rudnitskiydy@rusgeology.ru, ORCID ID: 0009-0002-4917-1049,

Плахотин Дмитрий Андреевич¹ — ассистент, e-mail: plakhotin@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,

Башмашников Илья Игоревич¹ — ассистент, e-mail: bash@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0009-5440-2850,

Ковалев Георгий Сергеевич — студент, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), e-mail: georkovalev@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-6016-0545,

¹ Южный Федеральный Университет, филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.

Для контактов: Д.А. Плахотин, e-mail: plakhotin@sfedu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Fomenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher, e-mail: vafomenko@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

D.Y. Rudnitskiy, Managing Director, Joint-Stock Company «Southern Scientific & Production Association for Marine Geological Explorations», e-mail: rudnitskiydy@rusgeology.ru, ORCID ID: 0009-0002-4917-1049,

D.A. Plakhotin¹, Assistant, Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: plakhotin@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,

I.I. Bashmashnikov¹, Assistant, Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: bash@sfedu.ru, ORCID ID: 0009-0009-5440-2850,

G.S. Kovalev, Student, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, North Ossetia — Alania, Russia, e-mail: georkovalev@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-6016-0545,

¹ Southern Federal University, branch of the Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia.

Corresponding author: D.A. Plakhotin, e-mail: plakhotin@sfedu.ru.

Получена редакцией 27.06.2026; получена после рецензии 30.07.2026; принята к печати 10.10.2026.

Received by the editors 27.06.2026; received after the review 30.07.2026; accepted for printing 10.10.2026.