



ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОГЕННЫХ ТЕЛ (СКЛАДИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ). ОБЗОР

В.В. Оленченко¹, С.Б. Бортникова¹, А.Ю. Девятова^{1,2}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru*

Рассмотрен мировой опыт использования методов электроразведки при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности), в частности, определение зональности хвостохранилищ, путей миграции дренажных потоков, уровня подземных вод, устойчивости дамб. Проводимые исследования демонстрируют высокую эффективность комплексирования методов геофизики, геохимии, гидрологии. На примере отвалов горнорудного производства, расположенных на территории Кемеровской области и Республики Тыва, показаны достижения междисциплинарного коллектива ИНГГ СО РАН. Применение электротомографии и магниторазведки в сочетании с геохимическим картированием и газовой съемкой позволило выявить внутреннее строение хвостохранилищ и отвалов, оконтурить обводненные горизонты, определить транспорт высокоминерализованных растворов в подземные воды. Полученные результаты стали основой для создания методологии комплексного исследования хвостохранилищ и отвалов, оценки опасности техногенных тел, разработки методов минимизации их влияния на окружающую среду и население поселков.

Малоглубинная электроразведка, отходы горнорудной промышленности, пути миграции, зональность, устойчивость сооружений

APPLICATION OF ELECTRICAL PROSPECTING METHODS FOR TECHNOGENIC BODIES (STORED WASTES OF THE MINING INDUSTRY) STUDIES: REVIEW

V.V. Olenchenko¹, S.B. Bortnikova¹, A.Yu. Devyatova^{1,2}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru*

The world experience of using electrical exploration methods in the study of technogenic bodies is considered, in particular: determining the zoning of tailings, groundwater migration routes and the stability of dams. The ongoing research demonstrates the high efficiency of combining the methods of geophysics, geochemistry, and hydrology. On the example of mining dumps located on the territory of the Kemerovo region and the Republic of Tyva, the achievements of the interdisciplinary team of the IPGG SB RAS are shown. The use of electrical resistivity tomography and magnetic prospecting in combination with geochemical mapping and gas survey made it possible to reveal the internal structure of tailings and dumps, outline watered horizons, and determine the transport of highly mineralized solutions to groundwater. Obtained results became the basis for creating a methodology for a comprehensive study of tailings and dumps, assessing the danger of technogenic bodies, and developing methods for minimizing their impact on the environment and the population of settlements.

Electrical resistivity tomography, mining waste, migration routes, zoning, stability of structures

ВВЕДЕНИЕ

Отходы горнорудных производств складываются в виде отвалов, хвостохранилищ, прудов-отстойников, как правило, недалеко от добывающих и обогащательных предприятий, в черте населенных пунктов. Происходящие со временем процессы трансформации вещества отходов, особенно, сульфидных минералов, приводят к появлению потоков кислого дренажа, инфильтрации жидкой фазы в подстилающие горизонты, нарушению ограждающих дамб и других опасных явлений. Металлы, металлоиды, сульфаты, переходящие в растворы при окислении вещества, могут мигрировать на прилегающие и удаленные территории, что вызывает серьезный риск загрязнения окружающей среды. Задачу выявления путей миграции химических элементов в различных компонентах среды решают с помощью геохимических и гидрогеохимических методов, а применение электроразведки существенно повышает эффективность исследований.

Возможность изучения геологической среды методами электроразведки основана на зависимости электромагнитных свойств геологической среды от влажности, температуры, литологического и минерального состава, минерализации поровой влаги [Манштейн, 2018].

Для оценки изменений окружающей среды во времени при изучении техногенных объектов лучше всего подходят методы малоглубинной электроразведки, такие как электротомография, георадиолокация, частотное электромагнитное зондирование. В последние годы развивается метод спектральной вызванной поляризации (СВП), который на основе анализа временных или частотных характеристик ВП даёт дополнительную информацию о свойствах геологической среды [Placencia-Gómez et al., 2015].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЗОНАЛЬНОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Методы сопротивлений часто используются для определения объемов старых/заброшенных хвостохранилищ [Martín-Crespo et al., 2018, 2020; Martin et al., 2020], а также для представления их внутренней структуры и неоднородности [Martinez-Pagan et al., 2021; Mollehuara-Canales et al., 2021]. Крупнообломочные пустые породы обладают более высоким сопротивлением, чем уплотненные слои мелких фракций частиц [Poisson et al., 2009; Anterrieu et al., 2010], что дает возможность лучшего понимания гидрогеохимической зональности отвалов [Raymond et al., 2021]. При этом содержимое хвостохранилища обычно обладает большей электрической проводимостью, чем окружающая среда, что позволяет правильно отобразить границу раздела коренных пород и дамб, используемых для хранения отходов [Booterbaugh et al., 2015; Gabarrón et al., 2020]. Gabarrón с коллегами использовали электроразведку для разграничения грубых и мелкодисперсных хвостов по контрасту их удельного сопротивления. Ряд авторов занимались составлением карт потенциально реакционноспособных отходов [Martínez et al., 2012, 2016; Dimech et al., 2017; Power et al., 2018] и даже количественным прогнозом содержания растворенных твердых веществ [Rucker et al., 2009].

Испанские ученые [Rey et al., 2021] для исследования хвостохранилищ успешно сочетают методы электротомографии и метода вызванной поляризации. Таким образом были выявлены высокосульфатные и карбонатные растворы в нижней части хвостохранилища Адаро, Южная Испания, что подтвердил химический анализ вод, отобранных в зоне насыщения.

Сообщалось о применении метода электротомографии (ЭТ) для оценки остаточной минерализации для вторичного извлечения полезных компонентов [Günther, Martin, 2016]. Авторы использовали ЭТ и спектральную вызванную поляризацию для картирования обводненных

высокоминерализованных линз в теле отвала для оценки возможности повторной переработки отходов в будущем [Günther, Martin 2016]. Методы электроразведки применяются для реконструкции пространственного распределения отходов горнодобывающей промышленности в больших масштабах и оценки остаточной минерализации растворов в отвалах [Qi et al., 2018; Martin et al., 2020] и хвостохранилищах [Saladich et al., 2016; Martínez-Segura et al., 2020]. В большинстве случаев определяется порог удельного электрического сопротивления (УЭС) для картирования зон, содержащих минерализованные растворы в складированных отходах, которые, как правило, обладают большей проводимостью [Saladich et al., 2016; Martin et al., 2020]. Эффективно применялся метод ВЭЗ в комплексе с аэрофотограмметрией или лидарной топографией поверхности для восстановления объема отходов [Markovaara-Koivisto et al., 2018; Martín-Crespo et al., 2018]. Эти результаты представляют большой интерес для развития экономики замкнутого цикла, поскольку знания о пространственном распределении водонасыщенных горизонтов и уровня минерализации поровых растворов необходимы при оценке ограничений при разработке техногенных тел в качестве вторичного сырья [Kinnunen, Kaksonen, 2019].

ВЫЯВЛЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПУТЕЙ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Особую опасность представляют кислые дренажные растворы (в англоязычной литературе широко используемый термин – acid mine drainage, AMD), которые образуются за счет перехода химических элементов при окислении и растворении сульфидной составляющей. Для выявления путей миграции дренажных растворов и мониторинга их распространения в окружающей среде электроразведку используют с 1990-х годов [Ebraheem et al., 1990; King, McNeill, 1994; Benson, Addams, 1998; Buselli, Lu, 2001]. AMD генетически связан с поровыми растворами хранилищ, содержащими высокие концентрации ионов металлов [Blowes et al., 2014; Cravotta III, 2008], что увеличивает электропроводность поровых вод на несколько порядков [Monterroso, Macías, 1998]. Пути транспорта AMD отчетливо визуализируется на геоэлектрических разрезах и картах, и электротомография является надежным инструментом при мониторинге распространения потоков [Buselli, Lu, 2001; Johnston et al., 2017], позволяя обнаруживать и разграничивать области генерации высокоминерализованного дренажа в пределах техногенных тел [Tycholiz et al., 2016; Shokri et al., 2023]. Результаты электроразведки на хвостохранилищах используются для составления схем геохимического опробования и картирования [Martínez-Pagán et al., 2009; Pierwoła et al., 2020] разработки рекультивационных мероприятий (например, при консервации техногенных тел) для минимизации воздействия отходов на окружающую среду [Martínez-Pagán et al., 2009; Hudson et al., 2018]. Метод ЭТ успешно использовался для отслеживания миграции AMD в отвалах [Shokri et al., 2016; Hudson et al., 2018; Casagrande et al., 2020], для выявления механизмов транспорта загрязняющих веществ из хранилищ в окружающую среду [Bethune et al., 2015; Casagrande et al., 2016; do Nascimento et al., 2022], обнаружения ослабленных трещиноватых зон в коренных подстилающих породах [Benyassine et al., 2017], оценки масштабов эолового переноса вещества [Lachhab et al., 2020], определения утечек [Cortada et al., 2017; Rey et al., 2021].

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБ

О применении метода ЭТ для оценки геотехнической устойчивости плотин и дамб сообщалось с 2005 года в раннем исследовании Sjö Dahl et al. [2005]. С тех пор ЭТ использовалась при обнаружения аномальной фильтрации и внутренней эрозии в пределах дамб [Sjö Dahl et al., 2005; Li et al., 2015; Mainali

et al., 2015; Coulibaly et al., 2017; Paria et al., 2020], для определения уровня грунтовых вод при угрозе риска перелива воды и разработке мероприятий для его снижения [Booterbaugh et al., 2015; Mainali et al., 2015]. Такие приложения имеют большой потенциал для мониторинга геотехнической устойчивости полигонов твердых бытовых отходов (ТБО), поскольку просачивание, эрозия плотин и затопление были причиной почти 60 % закрытий полигонов ТБО во всем мире с 1910 года [Lyu et al., 2019]. В ряде исследований объединены электротомография и геотехническое моделирование для изучения стабильности хвостохранилищ [Li et al., 2015; Coulibaly et al., 2017; Paria et al., 2020], как это уже было сделано для мониторинга оползней [Lehmann et al., 2013; Zieher et al., 2017] или мониторинга дамб [Weller et al., 2014; Dezert et al., 2019]. Разномасштабный мониторинг состояния дамбы хвостохранилища Enemossen (Швеция) позволил уверенно оконтурить места протечек через дамбу и существенно уменьшить неоднозначность в интерпретации данных ЭТ [Sjödahl et al., 2005]. В соответствии с недавними разработками метода таймлапс (time-lapse) в электроразведке, мониторинг оползней возможно проводить в режиме реального времени, что важно для разработки систем раннего предупреждения опасности [Kłosowski et al., 2018; Whiteley et al., 2019]. Как обсуждалось Tresoldi et al. [2020], ожидается, что применение таймлапс в электроразведке будет становиться все более востребованным, учитывая новые знания об активных процессах в техногенных телах, возникающих экологических рисках и разработок методов их предупреждения.

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНГГ СО РАН

В ИНГГ СО РАН на протяжении более 10 лет широко проводятся комплексные исследования техногенных тел с применением геохимических и геофизических методов. Исследованы хвостохранилища и отвалы в Западной Сибири, Забайкалье и Республике Тыва. Комплексирование методов геохимического картирования, электро- и магниторазведки позволило получить информацию о внутреннем строении техногенных тел, структуре подповерхностного пространства дренажных систем, найти взаимосвязи состава твердого вещества и межпоровых флюидов, а также описать процессы трансформации техногенных тел.

Определение внутреннего строения отвалов и хвостохранилищ

На территории бывшего Беловского цинкового завода (г. Белово, Кемеровская обл.) было проведено определение геоэлектрической зональности болота-отстойника, выявившего проникание высокоминерализованных растворов на глубину более 10 м, в горизонт грунтовых и подземных вод [Bortnikova et al., 2011]. При этом показано, что высокие концентрации металлов в воде отстойника приводят к мутационным изменениям зоопланктона. На отвале клинкеров, поставляющем растворы в болото-отстойник, обнаружены очаги горения во внутренних его частях, определен элементный состав газовых потоков и в лабораторных экспериментах показано, что наиболее высокие концентрации элементов в газах при нагревании отделяются от образцов клинкера с обильными вторичными сульфатами [Bortnikova et al., 2017].

На хвостохранилище Талмовские Пески, расположенном в русле р. Малая Талмовая (г. Салаир, Кемеровская обл.), проведено изучение распределения металлов (их общих содержаний, водорастворимых форм, растворенных в поровых водах) по вертикали [Bortnikova et al., 2015]. На основе геоэлектрической зональности разреза и протяженности высокопроводящих зон на глубину сделан вывод о распространении загрязнения подземных вод до гл. 10 м и прогноз изменения геохимических

характеристик вещества до гл. 7 м. Более поздними работами на этом хвостохранилище установлены гидрохимические и газовые аномалии, а также показано корреляция геофизических и геохимических параметров вещества путем построения профилей микроэлектротомографии по линиям шурфов [Бортникова и др., 2021].

На Комсомольском хвостохранилище (пос. Комсомольск, Кемеровская обл.) проведен сбор проб и их анализ: твердого вещества, воды гидроотвала, водоемов на перемещенных Бериккульских кеках, дренажных ручьев, питьевой воды. Одновременно проводилось исследование внутренней структуры техногенного тела, геометризация обводненных участков, определение путей миграции подземных вод [Bortnikova et al., 2017; Yurkevich et al., 2017]. Выявлено, что несмотря на устойчивость ограждающей дамбы, под ней по природному разлому идет транспорт кислых высокоминерализованных растворов в горизонты подземных питьевых вод. Превышение концентраций мышьяка было обнаружено в питьевой воде из колонки в пос. Комсомольский, расположенной невдалеке от разлома.

На Урском отвале отходов цианирования зоны окисления Ново-Урского месторождения (сформирован в 30–40-е годы прошлого века, пос. Урск, Кемеровская обл.) определен состав дренажных потоков с чрезвычайно высокими концентрациями многих токсичных элементов, формы их нахождения и миграции. Путем построения геоэлектрических разрезов вкrest дренажной системы показано, что вертикальное распространение дренажных растворов идет по двум направлениям: поверхностный сток по уклону долины и проникание дренажа по ослабленным зонам тектонического нарушения на глубину более 20 м [Оленченко и др., 2016]. На отвале и прилегающей территории были обнаружены и оконтурены аномалии газов: диметилсульфида C_2H_6S , диметилсульфоксида C_2H_6SO , сероуглерода CS_2 , диоксида серы SO_2 , свидетельствующие о том, что техногенные тела являются постоянным источником серосодержащих газов в приземном слое атмосферы. При этом была обнаружена связь между внутренней зональностью техногенного тела и интенсивностью газообразования: в высокопроводящих зонах оно заметно возрастало по сравнению с соседними участками с низкой проводимостью [Yurkevich et al., 2019]. На 3D модели было показано и обосновано формирование трех основных зон: окисления, выщелачивания и разбавления/осаждения, обусловленных наличием геохимических барьеров и идентифицированных с помощью электро- и магниторазведочных методов [Yurkevich et al., 2022]. На примере вещества Урского отвала лабораторными экспериментами была оценена скорость фронта жидкости (дренажного раствора), составляющая 140 мм/сут. Показано, что капиллярные силы вносят основной вклад в распространение растворов [Кучер и др., 2019].

На Хову-Аксинских картах, вмещающих отходы гидрометаллургического обогащения Cu–Co–Ni–арсенидных руд оценены общие концентрации металлов и металлоидов, их подвижных форм (водорастворимых и летучих), определены закономерности изменения их концентраций за 20-летний период хранения [Bortnikova et al., 2021]. Минералогическим изучением тяжелой фракции отходов показано, что вторичные каймы на остаточных арсенидах существенно снижают подвижность металлов, но концентрации водорастворимых формы As и Sb остаются по-прежнему высокими. На профилях электротомографии обнаружено распространение высокопроводящих зон за границы защитного слоя хранилищ, что означает миграцию поровых растворов в подземные горизонты.

Динамика внутренней зональности техногенных тел

Особого внимания заслуживают исследования изменения электрических свойств вещества отвалов и интенсивности газовых эманаций в зависимости от внешних метеорологических условий (time-

lapse study). На участке Белоключевского отвала на профиле микроэлектротомографии были проведены ежечасные измерения УЭС в течение суток с одновременным замером температуры грунта и последующим лабораторным моделированием зависимости вариаций УЭС от гранулометрии вещества [Olenchenko et al., 2020]. Определено, что наибольшие колебания УЭС в течение суток происходят на участках профиля, сложенных окисленным веществом отходов полидисперсного состава. На хвостохранилище Салагаевский лог установлено, что изменение температуры воздуха через 2–3 часа ведет к изменению температуры грунта и, соответственно, УЭС верхних горизонтов. Наибольшая разница УЭС расположена в зонах с низкой электропроводностью и высокой влажностью. Внешние проявления динамики параметров вещества заключаются в меняющейся газогенерации (CO , SO_2 , $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$, H_2S) в течение суток, прямо зависящей от температуры грунта и имеющей прямую корреляцию со значениями УЭС [Yurkevich et al., 2021].

Генезис жидкости, выносимой из газовых скважин

При исследовании жидкостей, выносимых из газовых скважин, установлено, что гидрохимический состав отражает доленое соотношение пластовых, техногенных и конденсационных вод. При этом диэлектрические и радиоизлучательные параметры жидкости изменяются в зависимости от долевого соотношения разных типов вод [Эпов и др., 2017]. Предложены способы диагностики типов воды по их диэлектрическим параметрам в лабораторных условиях. В продолжение этих исследований был выполнен гидрохимический анализ и ЯМР-релаксометрия проб жидкостей из скважин на Юбилейном, Ямсовейском и Медвежьем месторождениях ЯНАО [Шумскайте и др., 2017]. Экспериментально подтверждено, что время релаксации существенно зависит от концентрации парамагнитных ионов металлов, что составляет основу для оперативной типизации по ЯМР-данным жидкости и позволяет однозначно выделять техногенную воду.

ВЫВОДЫ

Применение методов электроразведки и современных технических и программных средств является эффективным и оперативным инструментом для анализа состояния складированных отходов и техногенных сооружений. Предложенный и опробованный в ИНГГ СО РАН подход к изучению отвалов хвостов обогащения основан на мировом опыте применения методов малоглубинной электроразведки, а в некоторых аспектах методы ЭТ на техногенных телах позволили получить новые, необсуждавшиеся ранее результаты.

В результате применения такого подхода на ряде объектов Кемеровской области было выявлено внутреннее строение отвалов и хвостохранилищ, обнаружена миграция минерализованного дренажа в подземные воды и горизонты питьевого водоснабжения, количественно описано изменение геоэлектрических параметров техногенных тел в зависимости от внешних условий.

Перспективами дальнейшего развития данного направления в России является внедрение технологии спектральной вызванной поляризации для изучения вещества отвалов. Частотные или временные зависимости параметров вызванной поляризации позволят вывести геофизические исследования в этой области на новый уровень.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовых проектов ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0028 и FWZZ-2022-0024.

ЛИТЕРАТУРА

- Бортникова С.Б., Юркевич Н.В., Еделев А.В., Саева О.П., Грахова С.П., Карин Ю.Г.** Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – № 332 (2). – С. 26–35, doi: 10.18799/24131830/2021/2/3040.
- Кучер Д.О., Корнеева Т.В., Бортникова С.Б.** Лабораторное моделирование фильтрации поровых флюидов в образцах техногенного вещества хвостохранилищ // Физико-технические проблемы переработки полезных ископаемых. – 2019. – № 5. – С. 26–32, doi: 10.15372/FTPRPI20190504.
- Манштейн А.К.** Электроразведка: Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под редакцией проф. И.Н. Модина и доц. А.Г. Яковлева. Том I. – Тверь: ПолиПРЕСС, 2018. – 276 с.
- Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П.** Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика. – 2016. – № 57 (4). – С. 782–795, doi: 10.15372/GiG20160410.
- Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Бортникова С.Б., Харитонов А.Н., Пермьяков В.С.** Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважин, методом ЯМР-релаксометрии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – № 328 (2). – С. 59–66.
- Эпов М.И., Меньшиков С.Н., Харитонов А.Н., Романов А.Н., Пермьяков В.С., Бортникова С.Б., Юркевич Н.В.** Диэлектрические и радиоизлучательные характеристики пластовых и конденсационных вод газоносных скважин // Геология и геофизика. – 2017. – № 58 (7). – С. 1047–1056, doi: 10.15372/GiG20170707.
- Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M.** Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2010. – Vol. 69 (4). – P. 533–548, doi: 10.1007/s10064-010-0264-4.
- Benson A.K., Addams C.L.** Detecting the presence of acid mine drainage using hydrogeological, geochemical, and geophysical data; applications to contrasting conditions at mine sites in Little Cottonwood and American Fork canyons, Utah // Environmental Geosciences. – 1998. – Vol. 5 (1). – P. 17–27.
- Benyassine E.M., Lachhab A., Dekayir A., Parisot J.C., Rouai M.** An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – Vol. 22 (4). – P. 315–324, doi: 10.2113/JEEG22.4.315.
- Bethune J., Randell J., Runkel R.L., Singha K.** Non-invasive flow path characterization in a mining-impacted wetland // Journal of Contaminant Hydrology. – 2015. – Vol. 183. – P. 29–39, doi: 10.1016/j.jconhyd.2015.10.002.
- Blowes D., Ptacek C., Jambor J., Weisener C.G., Pectunc D., Gould W.D., Johnson D.B.** The geochemistry of acid mine drainage // Treatise on Geochemistry. – 2014. – Vol. 11. – P. 131–190, doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.
- Booterbaugh A.P., Bentley L.R., Mendoza C.A.** Geophysical characterization of an undrained dyke containing an oil sands tailings pond, Alberta, Canada // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2015. – Vol. 20 (4). – P. 303–317, doi: 10.2113/JEEG20.4.303.

- Bortnikova S., Manstein Yu., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A.** Acid mine drainage migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): Multidisciplinary study // *Water Security in the Mediterranean Region. An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches* / Eds. A. Scozzari, B. Mansouri. – Springer, Netherlands, 2011. – P. 191 – 208, doi: 10.1007/978-94-007-1623-0_14.
- Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O.** The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas // *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control. Handbook of Environmental Chemistry*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – Vol. 40. – P. 239–256.
- Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Gaskova O.L., Chernii K.I., Devyatova A.Yu., Kucher D.O.** Evidence of trace element emission during the combustion of sulfide-bearing metallurgical slags // *Applied Geochemistry*. – 2017. – Vol. 78. – P. 105–115, doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.016.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.Sh., Gora M.P., Khvachchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V.** Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586 (30). – 120623, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120623.
- Buselli G., Lu K.** Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 48 (1). – P. 11–23, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00055-6.
- Casagrande M.F.S., Moreira C.A., Targa D.A.** Study of generation and underground flow of acid mine drainage in waste rock pile in an uranium mine using electrical resistivity tomography // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (2). – P. 703–721, doi: 10.1007/s00024-019-02351-9.
- Cortada U., Martínez J., Rey J., Hidalgo M.C., Sandoval S.** Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydrochemical techniques // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 223. – P. 59–70, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.04.024.
- Coulibaly Y., Belem T., Cheng L.** Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27 (4). – P. 701–710, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.05.012.
- Cravotta C.A. III** Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: Geochemical controls on constituent concentrations // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23 (2). – P. 203–226, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.10.003.
- Dezert T., Fargier Y., Lopes S.P., Côte P.** Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 260. – 105206, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105206.
- Dimech A., Chouteau M., Chou E.T.-K., Aubertin M., Martin V., Bussière B., Plante B.** Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection // *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. – Denver, Colorado, USA, 2017. – P. 195–203, doi: 10.4133/SAGEEP.30-009.
- do Nascimento M.M.P.F., Moreira C.A., Duz B.G., Silveira A.J.** Geophysical diagnosis of diversion channel infiltration in a uranium waste rock pile // *Mine Water and the Environment*. – 2022. – Vol. 41 (2). – P. 704–720, doi: 10.1007/s10230-022-00878-3.
- Ebraheem A., Hamburger M., Bayless E., Krothe N.C.** A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements // *Groundwater*. – 1990. – Vol. 28 (3). – P. 361–368, doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02265.x.

- Gabarrón M., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M.A., Buesco M.C., Martínez-Martínez S., Faz Á., Acosta J.A.** Electrical resistivity tomography as a support tool for physicochemical properties assessment of near-surface waste materials in a mining tailing pond (EL Gorguel, SE Spain) // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10 (6). – 559, doi: 10.3390/min10060559.
- Günther T., Martin T.** Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap // *Journal of Applied Geophysics*. – Vol. 135. – P. 436–448, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.008.
- Hudson E., Kulesa B., Edwards P., Williams T., Walsh R.** Integrated hydrological and geophysical characterisation of surface and subsurface water contamination at abandoned metal mines // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2018. – Vol. 229. – 256, doi: 10.1007/s11270-018-3880-4.
- Johnston A., Runkel R.L., Navarre-Sitchler A., Singha K.** Exploration of diffuse and discrete sources of acid mine drainage to a headwater mountain stream in Colorado, USA // *Mine Water and the Environment*. – Vol. 36 (4). – P. 463–478, doi: 10.1007/s10230-017-0452-6.
- King A., McNeill J.** Applications of Geophysical Methods for Monitoring Acid Mine Drainage. – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/461.pdf>.
- Kinnunen P.H.M., Kaksonen A.H.** Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P. 153–160, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.
- Kłosowski G., Rymarczyk T., Gola A.** Increasing the reliability of flood embankments with neural imaging method // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8 (9). – 1457, doi: 10.3390/app8091457.
- Lachhab A., Benyassine E.M., Rouai M., Dekayir A., Parisot J.C., Boujamaoui M.** Integration of multi-geophysical approaches to identify potential pathways of heavy metals contamination-a case study in Zeida, Morocco // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (3) – P. 415–423, doi: 10.32389/JEEG9-067.
- Lehmann P., Gambazzi F., Suski B., Baron L., Askarinejad A., Springman S.M., Holliger K., Or D.** Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure // *Water Resource Research*. – 2013. – Vol. 49 (12). – P. 7992–8004, doi: 10.1002/2013WR014560.
- Li Q.-M., Yuan H.-N., Zhong M.-H.** Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds // *Journal of Central South University*. – 2015. – Vol. 22 (7). – P. 2707–2718, doi: 10.1007/s11771-015-2801-6.
- Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J.** A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // *Advances in Civil Engineering*. – Vol. 2019. – 4159306, doi: 10.1155/2019/4159306.
- Mainali G., Nordlund E., Knutsson S., Thunehed H.** Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – P. 5859–5875.
- Markovaara-Koivisto M., Valjus T., Tarvainen T., Huotari T., Lerssi J., Eklund M.** Preliminary volume and concentration estimation of the Aijala tailings pond – Evaluation of geophysical methods // *Resources Policy*. – 2018. – Vol. 59. – P. 7–16, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.08.016.
- Martin T., Kuhn K., Günther T., Kniess R.** Geophysical exploration of a historical stamp mill dump for the volume estimation of valuable residues // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (2). – P. 275–286, doi: 10.2113/JEEG19-080.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martínez-Pagan P., De Ignacio C., Lillo J., Faz Á.** Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical

methods (Cartagena-La Union district, Spain) // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 232. – P. 135–146, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.

Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., De Ignacio-San José C., Lillo J., Faz Á. Abandoned mine tailings affecting riverbed sediments in the Cartagena-La Union district, Mediterranean coastal area (Spain) // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12 (12). – 2042, doi: 10.3390/rs12122042.

Martínez J., Rey J., Hidalgo M., Benavente J. Characterizing abandoned mining dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: the Linares-La Carolina district (southern Spain) // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2012. – Vol. 223 (6). – P. 2955–2968, doi: 10.1007/s11270-012-1079-7.

Martínez J., Hidalgo M., Rey J., Garrido J., Kohfahl C., Benavente J., Rojas D. A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 162. – P. 62–71, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.

Martínez-Pagán P., Faz Cano Á., Aracil E., Arocena J.M. Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2009. – Vol. 14 (2). – P. 63–76, doi: 10.2113/JEEG14.2.63.

Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Martín-Velázquez S., Martínez-Segura P. Electrical resistivity imaging applied to tailings ponds: an overview // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40. – P. 285–297, doi: 10.1007/s10230-020-00741-3.

Martínez-Segura M.A., Váscónez-Maza M.D., García-Nieto M.C. Volumetric characterisation of waste deposits generated during the production of fertiliser derived from phosphoric rock by using LiDAR and electrical resistivity tomography // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 716. – 137076, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137076.

Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J., Moisio K., Pedretti D. Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 192. – 104402, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104402.

Monterroso C., Macías F. Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils // *International Journal of Surface Mining, Reclamation Environment*. – 1998. – Vol. 12 (1). – P. 5–9, doi: 10.1080/09208119808944015.

Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Edelev A.V., Gora M.P. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – Vol. 57 (4). – P. 617–628, doi: 10.1016/j.rgg.2015.05.014.

Olenchenko V.V., Osipova P.S., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B. Electrical resistivity dynamics beneath the weathered mine tailings in response to ambient temperature // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (1). – P. 55–63, doi: 10.2113/JEEG18-096.

Paria C.J.B., Gamarra J.P.B., Pereira E.L. Geophysical-geotechnical investigation of an old tailings dam from a mine in the Peruvian highland // *Brazilian Journal of Geophysics*. – 2020. – Vol. 38 (1). – P. 20–31, doi: 10.22564/rbgf.v38i1.2035.

Pierwoła J., Szuszkiewicz M., Cabala J., Jochymczyk K., Żogała B., Magiera T. Integrated geophysical and geochemical methods applied for recognition of acid waste drainage (AWD) from Zn–Pb post-flotation tailing pile (Olkusz, Southern Poland) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27 (14). – P. 16731–16744, doi: 10.1007/s11356-020-08195-4.

- Placencia-Gómez E., Parviainen A., Slater L., Leveinen J.** Spectral induced polarization (SIP) response of mine tailings // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 173. – P. 8–24, doi: 10.1016/j.jconhyd.2014.12.002.
- Poisson J., Chouteau M., Aubertin M., Campos D.** Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 67 (2). – P. 179–192, doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.10.011.
- Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M.** Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – Vol. 150. – P. 40–51, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.01.009.
- Qi Y., Soueid Ahmed A., Revil A., Ghorbani A., Abdulsamad F., Florsch N., Bonnenant J.** Induced polarization response of porous media with metallic particles – Part 7: Detection and quantification of buried slag heaps // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 83 (5). – P. E277–E291, doi: 10.1190/geo2017-0760.1.
- Raymond K.E., Seigneur N., Su D., Mayer K.U.** Investigating the influence of structure and heterogeneity in waste rock piles on mass loading rates – A reactive transport modeling study // *Frontiers Water*. – 2021. – Vol. 3. – 39, doi: 10.3389/frwa.2021.618418.
- Rey J., Martínez J., Hidalgo M.C., Mendoza R., Sandoval S.** Assessment of tailings ponds by a combination of electrical (ERT and IP) and hydrochemical techniques (Linares, Southern Spain) // *Mine Water and Environment*. – 2020. – Vol. 40. – P. 298–307, doi: 10.1007/s10230-020-00709-3.
- Rucker D.F., Glaser D.R., Osborne T., Maehl W.C.** Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways // *Mine Water and Environment*. – 2009. – Vol. 28 (2). – P. 146–157, doi: 10.1007/s10230-009-0072-x.
- Saladich J., Rivero L., Queralt I., Lovera R., Font X., Himi M., Casas A., Sendros A.** Geophysical evaluation of the volume of a mine tailing dump (Osor, Girona, NE Spain) using ERT // *Near Surface Geoscience 2016 – 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – EAGE, 2016. – cp-495-00153, doi: 10.3997/2214-4609.201602054.
- Shokri B.J., Ardejani F.D., Moradzadeh A.** Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, geo-electrical and IP techniques – A case study, NE Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75 (1). – 62, doi: 10.1007/s12665-015-4776-x.
- Shokri B.J., Shafaei F., Ardejani F.D., Mirzaghorbanali A., Entezam S.** Use of time-lapse 2D and 3D geoelectrical inverse models for monitoring acid mine drainage-a case study // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. – 2023. – Vol. 32 (4). – P. 376–399, doi: 10.1080/15320383.2022.2090895.
- Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S.** Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // *Environmental Geology*. – 2005. – Vol. 49 (2). – P. 267–273, doi: 10.1007/s00254-005-0084-1.
- Tresoldi G., Hojat A., Cordova L., Zanzi L.** Permanent geoelectrical monitoring of tailings dams using the autonomous G.RE.T.A system // *Proceeding of the Conference “Tailings and Mining Wastes”*. – Keystone, Colorado, USA, 2020. – P. 729–739.
- Tycholiz C., Ferguson I.J., Sherriff B., Cordeiro M., Sri Ranjan R., Pérez-Flores M.A.** Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 131. – P. 29–40, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.05.006.

- Weller A., Lewis R., Canh T., Möller M., Scholz B.** Geotechnical and geophysical long-term monitoring at a levee of Red River in Vietnam // *Journal of Environmental Engineering Geophysics*. – 2014. – Vol. 19 (3). – P. 183–192, doi: 10.2113/JEEG19.3.183.
- Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M.** Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57 (1). – P. 106–145, doi: 10.1029/2018RG000603.
- Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Bortnikova S.B., Karin Y.G., Saeva O.P.** Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2017. – Vol. 99 (9–10). – P. 1328–1345, doi: 10.1080/02772248.2017.1371308.
- Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A.** Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2019. – Vol. 230. – 307, doi: 10.1007/s11270-019-4363-y.
- Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Fedorova T.A., Karin Y.G., Edelev A.V., Osipova P.S., Saeva O.P.** Time-lapse electrical resistivity tomography and soil-gas measurements on abandoned mine tailings under a highly continental climate, Western Siberia, Russia // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2021. – Vol. 26 (3). – P. 227–237, doi: 10.32389/JEEG21-004.
- Yurkevich N., Osipova P., Tsibizov L., Tsibizova E., Fadeeva I., Volynkin S., Tulisova K., Kuleshova T.** Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (20). – 10610, doi: 10.3390/app122010610.
- Zieher T., Markart G., Ottowitz D., Römer A., Rutzinger M., Meißl G., Geitner C.** Water content dynamics at plot scale-comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 544. – P. 195–209, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.019.

REFERENCES

- Anterrieu O., Chouteau M., Aubertin M.** Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2010. – Vol. 69 (4). – P. 533–548, doi: 10.1007/s10064-010-0264-4.
- Benson A.K., Addams C.L.** Detecting the presence of acid mine drainage using hydrogeological, geochemical, and geophysical data; applications to contrasting conditions at mine sites in Little Cottonwood and American Fork canyons, Utah // *Environmental Geosciences*. – 1998. – Vol. 5 (1). – P. 17–27.
- Benyassine E.M., Lachhab A., Dekayir A., Parisot J.C., Rouai M.** An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2017. – Vol. 22 (4). – P. 315–324, doi: 10.2113/JEEG22.4.315.
- Bethune J., Randell J., Runkel R.L., Singha K.** Non-invasive flow path characterization in a mining-impacted wetland // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 183. – P. 29–39, doi: 10.1016/j.jconhyd.2015.10.002.
- Blowes D., Ptacek C., Jambor J., Weisener C.G., Pactunc D., Gould W.D., Johnson D.B.** The geochemistry of acid mine drainage // *Treatise on Geochemistry*. – 2014. – Vol. 11. – P. 131–190, doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.

- Booterbaugh A.P., Bentley L.R., Mendoza C.A.** Geophysical characterization of an undrained dyke containing an oil sands tailings pond, Alberta, Canada // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2015. – Vol. 20 (4). – P. 303–317, doi: 10.2113/JEEG20.4.303.
- Bortnikova S., Manstein Yu., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Reutsky A.** Acid mine drainage migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): Multidisciplinary study // *Water Security in the Mediterranean Region. An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches* / Eds. A. Scozzari, B. Mansouri. – Springer, Netherlands, 2011. – P. 191 – 208, doi: 10.1007/978-94-007-1623-0_14.
- Bortnikova S., Yurkevich N., Bessonova E., Karin Y., Saeva O.** The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas // *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control. Handbook of Environmental Chemistry*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – Vol. 40. – P. 239–256.
- Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Gaskova O.L., Chernii K.I., Devyatova A.Yu., Kucher D.O.** Evidence of trace element emission during the combustion of sulfide-bearing metallurgical slags // *Applied Geochemistry*. – 2017. – Vol. 78. – P. 105–115, doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.016.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Edelev A.V., Saeva O.P., Grakhova S.P., Karin Yu.G.** Hydrochemical and gaseous anomalies on sulfide tailings (Salair, Kemerovo region) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2021. – Vol. 332 (2). – P. 26–35, doi: 10.18799/24131830/2021/2/3040.
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.Sh., Gora M.P., Khvachchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V.** Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586 (30). – 120623, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120623.
- Buselli G., Lu K.** Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods // *Journal of Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 48 (1). – P. 11–23, doi: 10.1016/S0926-9851(01)00055-6.
- Casagrande M.F.S., Moreira C.A., Targa D.A.** Study of generation and underground flow of acid mine drainage in waste rock pile in an uranium mine using electrical resistivity tomography // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (2). – P. 703–721, doi: 10.1007/s00024-019-02351-9.
- Cortada U., Martínez J., Rey J., Hidalgo M.C., Sandoval S.** Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydrochemical techniques // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 223. – P. 59–70, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.04.024.
- Coulibaly Y., Belem T., Cheng L.** Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27 (4). – P. 701–710, doi: 10.1016/j.ijmst.2017.05.012.
- Cravotta C.A.** III Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: Geochemical controls on constituent concentrations // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23 (2). – P. 203–226, doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.10.003.
- Dezert T., Fargier Y., Lopes S.P., Côte P.** Geophysical and geotechnical methods for fluvial levee investigation: A review // *Engineering Geology*. – 2017. – Vol. 260. – 105206, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105206.
- Dimech A., Chouteau M., Chou E.T.-K., Aubertin M., Martin V., Bussière B., Plante B.** Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection //

Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – Denver, Colorado, USA, 2017. – P. 195–203, doi: 10.4133/SAGEEP.30-009.

do Nascimento M.M.P.F., Moreira C.A., Duz B.G., Silveira A.J. Geophysical diagnosis of diversion channel infiltration in a uranium waste rock pile // *Mine Water and the Environment*. – 2022. – Vol. 41 (2). – P. 704–720, doi: 10.1007/s10230-022-00878-3.

Ebraheem A., Hamburger M., Bayless E., Krothe N.C. A study of acid mine drainage using earth resistivity measurements // *Groundwater*. – 1990. – Vol. 28 (3). – P. 361–368, doi: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb02265.x.

Epov M.I., Men'shikov S.N., Kharitonov A.N., Romanov A.N., Permyakov V.S., Bortnikova S.B., Yurkevich N.V. Dielectric and radio-frequency emission parameters of formation and condensate waters from gas wells // *Russian Geology and Geophysics*. – 2017. – Vol. 58 (7). – P. 836–843, doi: 10.1016/j.rgg.2017.06.006.

Gabarrón M., Martínez-Pagán P., Martínez-Segura M.A., Buesco M.C., Martínez-Martínez S., Faz Á., Acosta J.A. Electrical resistivity tomography as a support tool for physicochemical properties assessment of near-surface waste materials in a mining tailing pond (EL Gorguel, SE Spain) // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10 (6). – 559, doi: 10.3390/min10060559.

Günther T., Martin T. Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap // *Journal of Applied Geophysics*. – Vol. 135. – P. 436–448, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.008.

Hudson E., Kulessa B., Edwards P., Williams T., Walsh R. Integrated hydrological and geophysical characterisation of surface and subsurface water contamination at abandoned metal mines // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2018. – Vol. 229. – 256, doi: 10.1007/s11270-018-3880-4.

Johnston A., Runkel R.L., Navarre-Sitchler A., Singha K. Exploration of diffuse and discrete sources of acid mine drainage to a headwater mountain stream in Colorado, USA // *Mine Water and the Environment*. – Vol. 36 (4). – P. 463–478, doi: 10.1007/s10230-017-0452-6.

King A., McNeill J. Applications of Geophysical Methods for Monitoring Acid Mine Drainage. – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, <https://mend-nedem.org/wp-content/uploads/461.pdf>.

Kinnunen P.H.M., Kaksonen A.H. Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P. 153–160, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.171.

Kłosowski G., Rymarczyk T., Gola A. Increasing the reliability of flood embankments with neural imaging method // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8 (9). – 1457, doi: 10.3390/app8091457.

Kucher D.O., Korneeva T.V., Bortnikova S.B. Lab-scale modeling of pore fluid flow in samples of manmade substance from tailings ponds // *Journal of Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 55 (5). – P. 715–721, doi: 10.1134/S1062739119056087.

Lachhab A., Benyassine E.M., Rouai M., Dekayir A., Parisot J.C., Boujamaoui M. Integration of multi-geophysical approaches to identify potential pathways of heavy metals contamination-a case study in Zeida, Morocco // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (3) – P. 415–423, doi: 10.32389/JEEG9-067.

Lehmann P., Gambazzi F., Suski B., Baron L., Askarinejad A., Springman S.M., Holliger K., Or D. Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure // *Water Resource Research*. – 2013. – Vol. 49 (12). – P. 7992–8004, doi: 10.1002/2013WR014560.

Li Q.-M., Yuan H.-N., Zhong M.-H. Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds // *Journal of Central South University*. – 2015. – Vol. 22 (7). – P. 2707–2718, doi: 10.1007/s11771-015-2801-6.

- Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J.** A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history // *Advances in Civil Engineering*. – Vol. 2019. – 4159306, doi: 10.1155/2019/4159306.
- Mainali G., Nordlund E., Knutsson S., Thunehed H.** Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – P. 5859–5875.
- Manshtein A.K.** Electrical Exploration: A Manual on Electrical Exploration Practice for Students of Geophysical Specialties. Vol. I / Eds. I.N. Modina, A.G. Yakovleva. – PolyPRESS, Tver, 2018. – 276 p.
- Markovaara-Koivisto M., Valjus T., Tarvainen T., Huotari T., Lerssi J., Eklund M.** Preliminary volume and concentration estimation of the Aijala tailings pond – Evaluation of geophysical methods // *Resources Policy*. – 2018. – Vol. 59. – P. 7–16, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.08.016.
- Martin T., Kuhn K., Günther T., Kniess R.** Geophysical exploration of a historical stamp mill dump for the volume estimation of valuable residues // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (2). – P. 275–286, doi: 10.2113/JEEG19-080.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martínez-Pagan P., De Ignacio C., Lillo J., Faz Á.** Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain) // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 232. – P. 135–146, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.018.
- Martín-Crespo T., Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., De Ignacio-San José C., Lillo J., Faz Á.** Abandoned mine tailings affecting riverbed sediments in the Cartagena-La Union district, Mediterranean coastal area (Spain) // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12 (12). – 2042, doi: 10.3390/rs12122042.
- Martínez J., Rey J., Hidalgo M., Benavente J.** Characterizing abandoned mining dams by geophysical (ERI) and geochemical methods: the Linares-La Carolina district (southern Spain) // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2012. – Vol. 223 (6). – P. 2955–2968, doi: 10.1007/s11270-012-1079-7.
- Martínez J., Hidalgo M., Rey J., Garrido J., Kohfahl C., Benavente J., Rojas D.** A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 162. – P. 62–71, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.12.013.
- Martínez-Pagán P., Faz Cano Á., Aracil E., Arocena J.M.** Electrical resistivity imaging revealed the spatial properties of mine tailing ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2009. – Vol. 14 (2). – P. 63–76, doi: 10.2113/JEEG14.2.63.
- Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., Martín-Velázquez S., Martínez-Segura P.** Electrical resistivity imaging applied to tailings ponds: an overview // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40. – P. 285–297, doi: 10.1007/s10230-020-00741-3.
- Martínez-Segura M.A., Váscónez-Maza M.D., García-Nieto M.C.** Volumetric characterisation of waste deposits generated during the production of fertiliser derived from phosphoric rock by using LiDAR and electrical resistivity tomography // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 716. – 137076, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137076.
- Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J., Moisio K., Pedretti D.** Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 192. – 104402, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104402.
- Monterroso C., Macías F.** Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils // *International Journal of Surface Mining, Reclamation Environment*. – 1998. – Vol. 12 (1). – P. 5–9, doi: 10.1080/09208119808944015.

- Olenchenko V.V., Osipova P.S., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B.** Electrical resistivity dynamics beneath the weathered mine tailings in response to ambient temperature // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2020. – Vol. 25 (1). – P. 55–63, doi: 10.2113/JEEG18-096.
- Paria C.J.B., Gamarra J.P.B., Pereira E.L.** Geophysical-geotechnical investigation of an old tailings dam from a mine in the Peruvian highland // *Brazilian Journal of Geophysics*. – 2020. – Vol. 38 (1). – P. 20–31, doi: 10.22564/rbgf.v38i1.2035.
- Pierwoła J., Szuszkiewicz M., Cabala J., Jochymczyk K., Żogała B., Magiera T.** Integrated geophysical and geochemical methods applied for recognition of acid waste drainage (AWD) from Zn–Pb post-flotation tailing pile (Olkusz, Southern Poland) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27 (14). – P. 16731–16744, doi: 10.1007/s11356-020-08195-4.
- Placencia-Gómez E., Parviainen A., Slater L., Leveinen J.** Spectral induced polarization (SIP) response of mine tailings // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2015. – Vol. 173. – P. 8–24, doi: 10.1016/j.jconhyd.2014.12.002.
- Poisson J., Chouteau M., Aubertin M., Campos D.** Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 67 (2). – P. 179–192, doi: 10.1016/j.jappgeo.2008.10.011.
- Power C., Tsourlos P., Ramasamy M., Nivorlis A., Mkandawire M.** Combined DC resistivity and induced polarization (DC-IP) for mapping the internal composition of a mine waste rock pile in Nova Scotia, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – Vol. 150. – P. 40–51, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.01.009.
- Qi Y., Soueid Ahmed A., Revil A., Ghorbani A., Abdulsamad F., Florsch N., Bonnenant J.** Induced polarization response of porous media with metallic particles – Part 7: Detection and quantification of buried slag heaps // *Geophysics*. – 2020. – Vol. 83 (5). – P. E277–E291, doi: 10.1190/geo2017-0760.1.
- Raymond K.E., Seigneur N., Su D., Mayer K.U.** Investigating the influence of structure and heterogeneity in waste rock piles on mass loading rates – A reactive transport modeling study // *Frontiers Water*. – 2021. – Vol. 3. – 39, doi: 10.3389/frwa.2021.618418.
- Rey J., Martínez J., Hidalgo M.C., Mendoza R., Sandoval S.** Assessment of tailings ponds by a combination of electrical (ERT and IP) and hydrochemical techniques (Linares, Southern Spain) // *Mine Water and Environment*. – 2020. – Vol. 40. – P. 298–307, doi: 10.1007/s10230-020-00709-3.
- Rucker D.F., Glaser D.R., Osborne T., Maehl W.C.** Electrical resistivity characterization of a reclaimed gold mine to delineate acid rock drainage pathways // *Mine Water and Environment*. – 2009. – Vol. 28 (2). – P. 146–157, doi: 10.1007/s10230-009-0072-x.
- Saladich J., Rivero L., Queralt I., Lovera R., Font X., Himi M., Casas A., Sendros A.** Geophysical evaluation of the volume of a mine tailing dump (Osor, Girona, NE Spain) using ERT // *Near Surface Geoscience 2016 – 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – EAGE, 2016. – cp-495-00153, doi: 10.3997/2214-4609.201602054.
- Shokri B.J., Ardejani F.D., Moradzadeh A.** Mapping the flow pathways and contaminants transportation around a coal washing plant using the VLF-EM, geo-electrical and IP techniques – A case study, NE Iran // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – Vol. 75 (1). – 62, doi: 10.1007/s12665-015-4776-x.
- Shokri B.J., Shafaei F., Ardejani F.D., Mirzaghorbanali A., Entezam S.** Use of time-lapse 2D and 3D geoelectrical inverse models for monitoring acid mine drainage—a case study // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. – 2023. – Vol. 32 (4). – P. 376–399, doi: 10.1080/15320383.2022.2090895.

- Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N., Bortnikova S.B., Kharitonov A.N., Permyakov V.S.** NMR-relaxometry laboratory study of fluids taken from boreholes // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2017. – Vol. 328 (2). – P. 59–66.
- Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S.** Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden // *Environmental Geology*. – 2005. – Vol. 49 (2). – P. 267–273, doi: 10.1007/s00254-005-0084-1.
- Tresoldi G., Hojat A., Cordova L., Zanzi L.** Permanent geoelectrical monitoring of tailings dams using the autonomous G.RE.T.A system // *Proceeding of the Conference “Tailings and Mining Wastes”*. – Keystone, Colorado, USA, 2020. – P. 729–739.
- Tycholiz C., Ferguson I.J., Sherriff B., Cordeiro M., Sri Ranjan R., Pérez-Flores M.A.** Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 131. – P. 29–40, doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.05.006.
- Weller A., Lewis R., Canh T., Möller M., Scholz B.** Geotechnical and geophysical long-term monitoring at a levee of Red River in Vietnam // *Journal of Environmental Engineering Geophysics*. – 2014. – Vol. 19 (3). – P. 183–192, doi: 10.2113/JEEG19.3.183.
- Whiteley J.S., Chambers J.E., Uhlemann S., Wilkinson P.B., Kendall J.M.** Geophysical monitoring of moisture-induced landslides: A review // *Reviews of Geophysics*. – 2019. – Vol. 57 (1). – P. 106–145, doi: 10.1029/2018RG000603.
- 2017. – Vol. 99 (9–10). – P. 1328–1345, doi: 10.1080/02772248.2017.1371308.
- Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich N., Edelev A., Saeva O., Shevko A.** Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2019. – Vol. 230. – 307, doi: 10.1007/s11270-019-4363-y.
- Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Fedorova T.A., Karin Y.G., Edelev A.V., Osipova P.S., Saeva O.P.** Time-lapse electrical resistivity tomography and soil-gas measurements on abandoned mine tailings under a highly continental climate, Western Siberia, Russia // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2021. – Vol. 26 (3). – P. 227–237, doi: 10.32389/JEEG21-004.
- Yurkevich N., Osipova P., Tsibizov L., Tsibizova E., Fadeeva I., Volynkin S., Tulisova K., Kuleshova T.** Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (20). – 10610, doi: 10.3390/app122010610.
- Zieher T., Markart G., Ottowitz D., Römer A., Rutzinger M., Meißl G., Geitner C.** Water content dynamics at plot scale-comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 544. – P. 195–209, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.019.

КОПОТКО ОБ АВТОРАХ

ОЛЕНЧЕНКО Владимир Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: применение электроразведочных методов геофизики при решении инженерно-геологических, рудопоисковых, геокриологических, геотехнических задач, поисках месторождений углеводородов и интерпретация электроразведочных данных.

БОРТНИКОВА Светлана Борисовна – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: прогнозная оценка опасности складированных отходов для окружающей среды, геохимия техногенеза и особенности формирования природно-техногенных ландшафтов в регионах с развитой горнодобывающей промышленностью.

ДЕВЯТОВА Анна Юрьевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент НГУ, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрoхимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: механизмы трансформации техногенных систем и формирования водных и воздушных аномалий, перенос химических элементов от техногенных источников в парoгазовой фазе, методы математического моделирования.