



Проблемы мониторинга складированных отходов горно-рудного производства в холодных климатических зонах: возможности использования геофизических методов

Н.В.Юркевич^{1,2,3}, Л.Ю.Епонешникова⁴, В.Н.Гуреев⁴✉, Н.А.Мазов⁴

¹ Институт геологии и минералогии имени В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт экологии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Как цитировать эту статью: Юркевич Н.В., Епонешникова Л.Ю., Гуреев В.Н., Мазов Н.А. Проблемы мониторинга складированных отходов горно-рудного производства в холодных климатических зонах: возможности использования геофизических методов // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 163-180. [EDN TSXPVH](#)

Аннотация

Складированные отходы горно-рудного производства, преимущественно представленные хвостохранилищами и отвалами, нуждаются в постоянном мониторинге. С одной стороны, они часто представляют опасность для окружающей среды и людей, с другой – с развитием новых технологий все чаще рассматриваются как источник вторичной переработки и добычи ценных компонентов. В холодных климатических зонах складирование отходов, поддержка хранилищ в стабильном состоянии и организация системы мониторинга имеют ряд особенностей. Отрицательные температуры, циклы замораживания и оттаивания приводят как к повышенному выходу потенциально токсичных веществ за пределы отвалов и хвостохранилищ, так и к нарушению целостности ограждающих сооружений. Проблема усугубляется глобальным потеплением, приводящим к большей подвижности верхних слоев из-за оттаивания мерзлого грунта. Проблемы мониторинга в холодных зонах обусловлены высокой стоимостью его проведения из-за удаленности территорий и трудностями работы в зимний период. Многообещающими в таких условиях становятся геофизические методы наблюдений, поскольку не нарушают целостности исследуемых объектов и обеспечивают автономный энергосберегающий режим в течение длительного срока. В статье рассматриваются возможности и особенности применения геофизических технологий для мониторинга складированных отходов горно-рудного производства в холодных климатических зонах. Используются примеры работ в России, Канаде, северных странах Европы и других странах со схожими климатическими условиями.

Ключевые слова

хвостохранилище; мониторинг; многолетняя мерзлота; геоэлектрика; электротомография; георадиолокация; сейсмография; сейсмическая томография; магнитометрические методы; рентгеновская томография

Финансирование

Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400237-8).

Поступила: 11.03.2025

Принята: 09.12.2025

Онлайн: 06.03.2026

Опубликована: 12.05.2026

Введение

С ростом общественного спроса на минеральные ресурсы горно-добывающая промышленность демонстрирует быстрые темпы развития по всему миру. Одним из негативных последствий горно-рудных работ становится большой объем отходов – необработанных вскрышных пород, сульфидсодержащей пустой породы после обогащения руд, хвостов флотации и цианирования, отходов промывки песков при добыче золота и алмазов. Обычно отходы складываются в отвалах и хвостохранилищах. Отвалы, как правило, малопригодны для вторичной переработки и часто подвергаются рекультивации. Хвостохранилища, напротив, характеризуются значительным содержанием потенциально полезных для вторичной переработки элементов, нередко представляемых мелкодисперсными частицами [1]. В особый тип выделяют подводные хвостохранилища, которые считаются перспективными, поскольку они высвобождают наземные пространства для других целей и в меньшей степени подвергаются окислению в связи с анаэробными условиями.



В холодных климатических зонах такой тип используется в Норвегии, где из-за пересеченной местности возможности организации наземных хвостохранилищ ограничены [2], тогда как в США и Канаде в настоящее время запрещен [3, 4], но использовался в прошлом [5].

Потенциал повторной добычи отдельных элементов зачастую приводит к решению о консервации, а не рекультивации хвостохранилищ. В зависимости от типа поллютантов хвостохранилища можно подразделить на выщелачиваемые, кислотные, цианидные, радиоактивные, легковоспламеняющиеся, содержащие органические вещества [6]. Отдельную проблему представляют собой хвостохранилища на территориях с давней историей добычи руды. Для таких локаций часто отсутствует документация со схемами отработки, что затрудняет определение точных границ хранилищ или само их расположение [7]. Схожая ситуация наблюдается в регионах с хищнической добычей. И в том, и в другом случае утилизация отходов проводилась без соблюдения регламентов и современных технологий, отчего эти типы складированных отходов требуют тщательного мониторинга [5].

Негативное воздействие складированных отходов горно-добывающей промышленности характеризуется широким спектром пагубного влияния на атмосферу, гидросферу, рельеф, флору и фауну. Оно обусловлено высокими для естественного фона концентрациями загрязняющих веществ, которые могут вступать в реакции как друг с другом, так и с элементами окружающей среды, увеличивая токсичность. Нередко присутствие в хвостах химикатов, используемых при переработке. Проникновению поллютантов в окружающую среду способствуют подвижные формы микроэлементов – активные агенты – из-за их способности переходить из твердых фаз в растворы, где они приобретают биодоступную форму [8]. При переходе в жидкую фазу легкорастворимые и легкоокисляемые формы потенциально токсичных веществ демонстрируют большую подвижность и могут проникать в поверхностные воды, подстилающие горизонты и растекаться по территории, распространяя радиоактивные элементы, металлы, следы органических веществ [9]. Образующиеся в результате техногенные воды могут проявляться в виде как небольших водотоков, так и крупных водоразделов, и действуют от десятков до сотен лет [10].

Особую экологическую опасность представляют кислотные фильтраты, образуемые в хвостах в результате выветривания. Добывающие компании обязаны предотвращать их попадание в окружающую среду [11], притом что затраты на рекультивацию кислотообразующих отходов могут многократно превышать расходы на рекультивацию отходов других типов. Кислотный дренаж характеризуется высокой концентрацией сульфат-ионов и металлов и обусловлен взаимодействием сульфидных минералов с водой и кислородом [12]. Окислительное выщелачивание потенциально токсичных соединений при определенных условиях может быть нейтрализовано, что зависит от содержания карбонатных минералов в отходах. Потенциал нейтрализации реализуется при сбалансированных скоростях окисления сульфидов и растворения карбонатов [13].

На интенсивность окисления сульфидных минералов, последующее высвобождение и мобилизацию потенциально токсичных компонентов, прежде всего тяжелых металлов, физические и механические свойства отходов, устойчивость ограждающих дамб существенное влияние оказывает гидрологический режим, обусловленный осадками, поверхностным стоком, испарением, чистой инфильтрацией [1, 14].

Таким образом, с учетом оказываемых складированными отходами негативных воздействий на природу и человека – с одной стороны, и их экономическим потенциалом – с другой, важное значение приобретает многолетний регулярный мониторинг как самих отходов, так и ограждающих сооружений, необходимый для полного понимания механизмов поведения складированных материалов в неблагоприятных климатических условиях [15]. Отходы горно-добывающих производств на территориях с холодным климатом имеют выраженные особенности, а их мониторинг часто затруднен погодными факторами и удаленностью, что увеличивает стоимость работ. Ввиду отмечаемой экспертами невысокой степени изученности вопроса [16-19] актуальным представляется исследование опыта северных регионов России и других стран со схожим климатом.

Материалы и методы

В работе использовались публикации 2019-2024 гг., индексируемые в библиографических базах Scopus и eLibrary. Поиск запросы были представлены тремя группами терминов, в заглавии, аннотации и ключевых словах совместно было представлено как минимум по одному термину из каждой группы:



- геофизические методы – геофизика, электромагнитные методы, метод переходных процессов, георадиолокация, электромагнитное профилирование, электротомография, микроэлектротомография, сейсмика, сейсмотомография, сейсморазведка, метод отраженных волн, метод преломленных волн, шумовая интерферометрия, сейсмостатическое зондирование, магнитометрия, рентгеновская томография;

- складированные отходы – отвалы, хвостохранилища, складированные отходы, отходы горно-рудного производства;

- холодные климатические условия – холодный климат, суровый климат, резко континентальный климат, холодные климатические зоны, холодные климатические пояса, вечная мерзлота, Арктика.

Применялись фильтры по типу документов – оригинальные и обзорные статьи; по языкам – русский и английский; по странам – Россия, США, Канада, Швеция, Финляндия, Норвегия, Дания. По указанным критериям было отобрано 288 источников. В статью вошли наиболее релевантные публикации, отобранные по итогам визуального изучения аннотаций и пристатейных списков литературы.

Результаты и обсуждение

Климатические факторы риска при хранении складированных отходов горно-рудного производства. Исследование складированных отходов в холодных климатических зонах предполагает, с одной стороны, анализ механизмов воздействия суровых погодных условий на состояние и поведение хвостов, а с другой – влияния хвостов на окружающую среду этих территорий. Понимание данного двунаправленного процесса является залогом минимизации наносимого отходами вреда, обеспечения устойчивости техногенных сооружений и возможности вторичного использования хвостов.

На территориях холодных климатических зон с низкими среднегодовыми температурами отмечаются пониженные реакционные способности компонентов складированных отходов горно-рудного производства с низкой скоростью химических и биологических реакций [6, 18]. Кислотнейтрализующий потенциал часто преобладает над кислотпродуцирующим из-за ограниченного доступа кислорода. Отсутствие инфильтрации воды приводит к замедленной миграции загрязняющих веществ. Однако под воздействием больших сезонных перепадов температур грунта и воздуха, циклов замерзания – оттаивания, осадков, эволюции вечной мерзлоты складированные отходы могут менять минералогический состав, геохимические и геофизические свойства. Поэтому возможно повышение подвижности загрязняющих веществ и ускорение их выхода за пределы хранилищ. При изучении влияния хвостов на окружающую среду холодных территорий следует учитывать маломощность почвенных профилей, большую хрупкость и долгие сроки восстановления экосистем [8].

Низкие температуры породы и воздуха полностью не предотвращают процессы гипергенной трансформации отходов, а вынос потенциально токсичных веществ в окружающую среду фиксируется круглогодично [20]. При отрицательных температурах в результате криогенных процессов отмечается повышенное содержание потенциально токсичных элементов в техногенных водах. Например, в хвостохранилищах оловосульфидных месторождений Приморского края при отрицательных температурах выявлена большая кислотность [10]. Схожие результаты получены в канадских сульфидных хвостохранилищах провинции Квебек, где выявлены высокие скорости окисления сульфидных минералов в ранних циклах испытаний [13].

Влияние температур на выщелачивание характеризуется тем, что вариации в растворимости соединений различных элементов обусловлены в том числе температурным режимом. На канадских флотационных хвостохранилищах в Квебеке показано, что низкие температуры вели к росту концентрации Ba, Sr, Ca, Na, Cl⁻, NO₃⁻ и SO₄²⁻ в поровых растворах из-за растрескивания крупных частиц [6]. Высокая степень связывания в криоземах фракциями мелкодисперсной пыли и ила Zn, Ni, Cr, Cu, Pb, As обнаружена на хвостохранилищах якутского Нюрбинского алмазодобывающего ГОКа [8]. При этом подвижные формы микроэлементов накапливались преимущественно в верхнем слое с последующим уменьшением в глубину либо аккумулировались в надмерзлотном слое, представляющем собой геохимический барьер.



В холодный период – с конца октября до начала мая – средняя температура хвостов составляет 0 °С или ниже. Она устанавливается в течение нескольких последовательных суток с отрицательной температурой воздуха и не претерпевает больших изменений до начала оттепели. Таким образом, хотя перепады температуры воздуха могут быть значительными, существенной суточной зависимости между температурой воздуха и породы в зимнее время нет.

На поддержание температуры хвостов в холодный период влияют несколько факторов. Одним из них является восходящий тепловой перенос из зоны экзотермического окисления сульфидов на глубине внутри хвостохранилищ, где температура всегда выше независимо от сезона. В этот период объемная влажность породы падает до нуля. Другим фактором является снежный наст и толщина снежного покрова, которая объясняет общие низкие колебания температуры хвостов и ее существенный контраст с температурой воздуха, который может достигать нескольких десятков градусов (что подтверждается данными наблюдения за вечномерзлыми территориями в Антарктиде [21]). Обильный снежный покров обеспечивает быстрые нисходящие потоки тепла, тогда как тонкий приводит к поверхностному замерзанию. Толстый снежный покров объясняет кажущееся парадоксальным общее понижение температуры хвостов к концу зимы, несмотря на повышающуюся солнечную радиацию и рост температуры воздуха, как показано на примере хвостохранилищ в Квебеке [15].

Влияние *циклов замораживания – оттаивания* на хвосты в сравнении с влиянием низких температур оказывается более выраженным и комплексным. Эти циклы имеют сезонный, а не суточный характер. Хотя в летний период и регистрируется более выраженная суточная зависимость температуры воздуха и поверхностного слоя хвостохранилищ [22], а летом нередко отмечаются ночные заморозки, их оказывается недостаточно для запуска процесса замерзания. Температура поверхностного слоя демонстрирует большую зависимость от температуры воздуха, тогда как более глубокие слои соотносятся со средней 48-часовой температурой воздуха [15]. Выраженные изменения температуры и содержания воды в ответ на циклы замерзания – оттаивания могут охватывать слои до 2 м в глубину [22].

Основной эффект сезонных циклов замерзания – оттаивания заключается в их влиянии на гидрологические процессы. С оттаиванием (обычно в конце апреля – начале мая) регистрируется быстрое и резкое увеличение содержания воды в хвостах с ростом объемной влажности до значений, близких к насыщению. Важным фактором становится объем снега: при таянии в локациях с толстым снежным покровом потоки воды более обильны, а в районах с тонким снегом замерзшая почва препятствует просачиванию воды в подземные слои [23]. На определенных территориях холодных климатических зон тающий снег является основным источником воды в хвостах [24]. Вклад в насыщение хвостов вносят и дожди, а с завершением летнего сезона отмечаются эффекты, связанные с падением уровня солнечной радиации, ведущей к снижению испаряемости [24].

В свою очередь, гидрологические процессы прямо участвуют в выходе потенциально токсичных веществ в окружающую среду [15, 22]. Если во время замерзания растворенные твердые вещества высвобождаются из ледяного фронта и концентрируются в оставшейся незамерзшей воде, то во время таяния растворенные поллютанты выходят из талой воды, снижая стабильность хвостохранилищ. В частности, во время весеннего оттаивания выявлена высокая степень выщелачивания потенциально токсичных веществ [11, 24]. Подтверждена также связь циклов с повышенной подвижностью металлов на хвостохранилищах [18].

Кроме концентрации металлов в ледяном фронте во время замерзания и их последующего выщелачивания при оттаивании мерзлых грунтов отмечается образование путей доступа кислорода, что ускоряет окисление вещества отходов. Доступ кислорода и водных потоков в глубокие слои хвостов, а также подвижность загрязняющих веществ сдерживается низкорекционным верхним затвердевшим слоем толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Эти эффекты обеспечиваются низкой пористостью и гидравлической проводимостью твердых горизонтов [25, 26]. Циклы замораживания – оттаивания могут приводить к их эрозии и снижению прочности [26]. В результате нарушается сформированный барьер между двумя горизонтами хвостохранилищ, что повышает водонасыщенность хвостов, ведет к росту окисления и выветриванию.

Многообещающим методом снижения кислотности хвостохранилищ представляется улавливание, закачка и последующее хранение углекислого газа в хвостохранилищах. Отмечается



перспективность минерализации CO_2 , выделяемого во время горно-добывающих процессов, по пути осаждения карбонатов. Это снижает проникновение кислорода в среду и предотвращает окисление сульфидов. Выделяют два пути минерализации углерода – *in situ*, при котором чистый CO_2 закачивается в хвостохранилище для образования карбонатных минералов, и *ex situ*, при котором в качестве поглотителя углерода используются горно-добывающие или промышленные отходы. Метод был апробирован на хвостохранилищах никелевой добычи в Финляндии [27] и в канадском Квебеке [28].

Зависимость геохимического поведения хвостов от низких температур и сезонных циклов замерзания – оттаивания описана на примере флотационных хвостохранилищ в канадском Квебеке, где исследовался потенциал добычи РЗМ из хвостов [6]. Карбонатная природа хвостов с высоким нейтрализующим потенциалом относительно потенциала кислотности приводила к низкому уровню кислотности дренажа. В то же время была выявлена повышенная выщелачиваемость Cd, Pb и Zn и формирование растворов с их концентрациями, превышающими естественный фон. Зависимость выщелачивания элементов от сезонных циклов показана на примере высокосульфидных отходов Урского хвостохранилища в Кемеровской обл. [20].

При рассмотрении воздействия циклов замораживания – оттаивания важной является оценка роли микроорганизмов, в том числе микроскопических грибов, вносящих большой вклад в окислительные процессы, образование серной кислоты, извлечение металлов в раствор. Их влияние на образование и перенос подвижных форм элементов оценивалось в хвостохранилищах полиметаллических руд Приморского края, где микроорганизмы показывали рост численности в широком диапазоне температур [29].

Таким образом, цикличность процессов, оказывающая многофакторное воздействие на состав и структуру отходов, устойчивость бортов хранилищ, должна приниматься во внимание при проектировании и строительстве стабильных хвостохранилищ, при рекультивационных работах, как показано на примере проектирования изоляционных покрытий с эффектом капиллярного барьера для хвостов никелевых руд в канадском Квебеке [12].

Влияние *потепления* – еще один фактор, который необходимо учитывать для обеспечения стабильного поведения складированных отходов. Анализ эффектов от потепления на холодных территориях особенно актуален, поскольку именно там повышение средней температуры происходит значительно быстрее, чем в других климатических зонах [30]. Как показывают данные мониторинга многолетней мерзлоты в Европе по программе PACE (Permafrost and Climate in Europe), за последние 25 лет многолетняя мерзлота могла прогреться до глубин в 50 м [31]. Средняя температура многолетней мерзлоты за последние 100 лет выросла на 0,4 °C [23]. Наибольшие температурные изменения фиксировались у поверхности Земли, увеличивая частоту смещений. Площадь активного слоя, например в Альпах и на Шпицбергене, выросла от 10 до 200 % с максимальным ростом на наиболее отдаленных и холодных территориях.

Основные и тесно взаимосвязанные факторы риска, вызванные потеплением и эволюцией многолетней мерзлоты, включают рост площадей активного слоя; смещение активного слоя, влияющее на устойчивость техногенных сооружений со складированными отходами; образование техногенных таликов; утечку техногенных вод; повышенную подвижность потенциально токсичных веществ и их ускоренный выход в окружающую среду; воздействие на глобальный круговорот углерода [14, 32].

Рост средних температур приводит к оттаиванию криоземов, в результате чего формируется переходная среда многолетней мерзлоты, где области ранее постоянно мерзлого грунта становятся незамерзающими, влияя на микробные и почвенные процессы, гидрологию, флору и фауну. Увеличивается активность и подвижность загрязняющих веществ, что ускоряет их выход в окружающую среду [17]. Высвобождение потенциально токсичных веществ ускоряется и за счет повышенной гидравлической проводимости почвы. Влияние таяния снега в таких локациях может достигать 10-метровой глубины, а более интенсивное взаимодействие поверхностных и грунтовых вод приводит к изменению их состава [23].

Еще одним следствием потепления становится снижение устойчивости и нарушение целостности горных пород и складированных отходов ГОКов, вызванное оползнями, камнепадами, проседаниями, просачиванием и протечками циркуляционных вод через борта и ложе плотин [14, 17, 33].



Это может приводить к крупным авариям и экологическим катастрофам со значительным экономическим, экологическим и социальным ущербом в краткосрочной (от нескольких часов до нескольких месяцев) и долгосрочной (от нескольких лет до нескольких столетий) перспективах.

Климатические факторы риска при хранении и обслуживании складированных отходов нуждаются в перманентном контроле. Мониторинг позволяет определять характеристики складированных отходов в холодных климатических зонах и фиксировать происходящие изменения, обеспечивает возможность идентификации потенциальных загрязнителей. Благодаря этому становится реализуемой разработка адекватной стратегии управления для их утилизации, консервации, вторичной переработки либо рекультивации. С развитием технологий актуализируется переход мониторинговых исследований в автоматический режим [4, 18], желательно с доступом общественности к его результатам [5, 34]. При этом если мониторинг поверхностного, подземного стока, ветрового сноса или испарения требует проведения полевых работ с применением геохимических и геотехнических методов, то ряд задач может быть решен в удаленном автоматическом и автономном режимах с использованием геофизических подходов. Геофизические методы незаменимы при оконтуривании тела техногенной системы, оценке общих объемов отходов, определении подземных путей миграции дренажа, выделении зон активного окисления сульфидных минералов, определении целостности и устойчивости бортов хранилищ. Применение геофизических методов позволяет в экспресс-режиме оптимизировать схему геохимического опробования, сократить общее число точек наблюдения и акцентировать внимание на зонах, требующих наибольшего контроля, что в свою очередь ведет к сокращению расходов и повышению точности результатов.

Геофизические методы мониторинга складированных отходов горно-рудного производства. Геофизические методы, позволяющие определять физические свойства грунтов, преимущественно используются в разведке полезных ископаемых [7]. В последнее время благодаря прогрессу в области компьютерных технологий и обработки данных они находят все большее применение в широком диапазоне междисциплинарных исследований [35], в том числе касающихся техногенных систем. В холодных климатических зонах применительно к хранилищам отходов горно-рудного производства геофизические методы используются редко [14, 23], отмечается недостаточная представленность данных в глобальных мониторинговых сетях в зонах многолетнемерзлых пород [32]. В то же время геофизические методы демонстрируют преимущества перед прочими подходами, включая аэрофотограмметрию, визуальный мониторинг, геохимический анализ или бурение [14, 36-38].

Визуальное исследование хвостов и ограждающих сооружений не дает информации о внутренних процессах, а бурение скважин для мониторинга в условиях холодного климата сопряжено с дополнительными расходами, локальностью применения и ведет к нарушению хрупких северных экосистем. Неинвазивные геофизические подходы предполагают проведение работ без нарушения напочвенных покровов и целостности объекта, позволяют охватить большие по площади территории, получить данные с больших глубин [39]. Кроме того, геофизическое оборудование позволяет проводить исследования в автономном и экономичном режиме, что снижает временные и финансовые затраты.

Для определения физических характеристик хвостов особо перспективными являются группы электромагнитных и сейсмических методов. Перспективными для задач мониторинга являются также магнитометрические, ядерные методы и метод рентгеновской томографии. К основным задачам, решаемым геофизическими методами, относятся следующие:

- *Планирование рационального размещения хвостов* с оценкой природных ландшафтов под складирование. Актуальной задачей является обеспечение долгосрочной стабильности хвостов и ограждающих сооружений, где принимаются во внимание стратиграфическая информация, данные о расположении подземных вод и горизонтов питьевой воды, сейсмичности региона и особенностях рельефа.

- *Оценка зональности и внутренней структуры складированных отходов*, где определяются объемы отходов, степень их неоднородности. Прежде всего это касается хвостов, находящихся в рельефных углублениях или открытых карьерах, прямой доступ к которым затруднен, а также хвостов, оставшихся после хищнической переработки, или старых хвостохранилищ, по которым нет документации [7]. Решение задачи картирования важно для оценки возможности повторной



добычи полезных элементов из складированных отходов, что актуализируется при разработке новых методов извлечения и обогащения минеральных ресурсов.

• *Оценка состояния и поведения хвостов.* Геофизические методы позволяют определять направления миграции кислых дренажных потоков, степень загрязнения почвенно-гидрологических горизонтов вредоносными веществами и таким образом вовремя выявлять опасные внутренние изменения еще до их проявления на поверхности [40–42]. Для обеспечения стабильности применяется перманентный анализ температуры вечномерзлых грунтов, что могут обеспечить геофизические методы, эффективные в любых температурных условиях. В частности, при околонулевых температурах на анализ потепления и охлаждения грунтов во многом влияют латентные термические эффекты, связанные с фазовыми переходами «вода – лед», тогда как геофизические методы позволяют оценить пространственно-временные изменения свойств грунта и в этих условиях [43].

• *Организация непрерывного и автономного получения данных в процессе геофизического мониторинга,* которая обеспечивается низким энергопотреблением и управлением геофизическим оборудованием через спутниковую связь, что позволяет оптимизировать частоту измерений и проводить прочие настройки [32]. В итоге исследователи получают возможность изучать отходы и ограждающие сооружения в динамике и отслеживать зависимость их состояния от внешних условий в режиме реального времени [31, 32, 37, 44]. Динамическая оценка проводится как на микроуровне суточных изменений, так и на более долгих сезонных и годовых дистанциях. Исследования хвостов в динамике в условиях холодного климата приобретают особое значение, поскольку суровые условия внешней среды могут существенно влиять на снимаемые параметры. Пространственно-временную изменчивость мерзлых хвостов зачастую можно исследовать исключительно геофизическими методами.

Электромагнитные методы (электроразведка). Изучение складированных отходов горнорудного производства методами электроразведки началось в 1990–2000 гг., в настоящее время ставшими наиболее распространенными мониторинговыми методами. Они основаны на оценке зависимости электромагнитных свойств геологической среды от влажности, минерального состава, температуры, давления, пористости, химического состава воды и некоторых других параметров [42, 43]. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) или его обратная величина – электропроводность – учитывают проводимость частиц (применимо для материалов с содержанием металлов), поверхностную проводимость (для различения минералов, льда и воды) и электролитическую проводимость (связанную с жидкостями и применимую для контроля пористости и насыщенности) [38, 43].

При определении зональности оценка УЭС позволяет четко обозначать границы хвостохранилищ, обладающих более высокой электрической проводимостью, чем соседствующие с ними породы. Определение же внутренней структуры основано на разнице в сопротивлении крупнокусковых и мелких отходов, где оно снижается с уменьшением размеров фракций. В холодных климатических зонах электроразведка позволяет эффективно различать мерзлые и талые породы. При замерзании удельное электрическое сопротивление горных пород может существенно увеличиться, так как замерзшая гравитационная вода становится практически изолятором, а электропроводность определяется лишь рыхлосвязанной незамерзшей водой близ поверхности минеральных частиц. Возрастание УЭС при замерзании разных горных пород различно: в скальных породах оно увеличивается не более чем в 10 раз, в тонкодисперсных рыхлых породах (глины, суглинки) – в 10–100 раз, в грубодисперсных (пески, гравийно-галечниковые отложения) – до 1000 и более раз [37].

Преимущества применения методов электроразведки при исследовании складированных отходов добычи и обогащения руд включают оптимизацию схемы отбора образцов для определения их химического состава и оперативный сбор информации для оценки объемов техногенных отложений и картирования области фильтрации дренажных растворов [45]. Результатами электроразведочных исследований становятся геоэлектрические разрезы, которые интерпретируются на качественном уровне с некоторыми прогнозными оценками локализации горизонтов высокоминерализованных поровых растворов. Делаются попытки четкого оконтуривания зон окисления сульфидсодержащих минералов в составе отходов.

Данные, полученные авторами в предыдущих исследованиях, свидетельствуют о том, что при одной и той же водонасыщенности и литологической структуре сульфидсодержащие отходы из



разных зон обладают электропроводностью, различающейся на порядок [46]. Результаты по применению методов электроразведки в комплексе с геохимическими подходами при изучении складированных отходов горно-рудного производства позволили локализовать области с относительно высокими удельными электрическими сопротивлениями с высокими концентрациями сульфидных минералов железа и мышьяка, которые при контакте с грунтовыми и атмосферными водами становятся источниками кислотных высокоминерализованных растворов [45]. Понимание механизмов миграции и осаждения химических элементов внутри тела отходов и их выноса за пределы техногенной системы будет более ясным при правильной интерпретации данных электроразведки, а для этого нужны точные знания о природе электрической проводимости отходов, о вкладе в него проводимости минерального остова и порового раствора, что позволит на основе геофизических данных прогнозировать развитие техногенной системы. Кроме того, применение электроразведочных методов может быть полезным для выделения горизонтов, аккумулирующих металлы, так называемых геохимических барьеров [46].

При мониторинге часто используются такие методы электроразведки, как электротомография, георадиолокация, частотное электромагнитное зондирование, электротомография методом вызванной поляризации и др. В зависимости от условий полевых участков может применяться сочетание двух и более методов. При интерпретации данных электроразведки можно получить оценку мощности техногенных отложений, описание геоэлектрической зональности, локализации областей фильтрации дренажных вод или скопления сульфидных минералов [7, 19].

Метод переходных процессов. Электромагнитное зондирование методом переходных процессов (МПП, Transient electromagnetic method, TEM) основано на исследовании поля переходных процессов, возбуждаемого в недрах при импульсном включении тока в источнике. Метод отличается отсутствием гальванического заземления, возможностью применения в зимний период, хорошо адаптирован к территориям в холодных климатических зонах из-за отсутствия экранирующего влияния от мерзлого горизонта. Подходит для выявления талых пород, характеризующихся низким УЭС, на фоне мерзлых грунтов, у которых при той же влажности, литологии и минерализации поровой влаги отличительным признаком является низкая температура. Метод использовался при оценке устойчивости хвостохранилища в условиях растепления многолетнемерзлых грунтов на одном из сибирских алмазодобывающих предприятий [14]. Вглубь были исследованы зоны разломов, по которым шел дренаж из хвостохранилища, выявлен тип их трещиноватости и фильтрационные свойства. Полученные результаты перспективны для планирования противофильтрационных мероприятий.

Георадиолокация (ГРЛ), или георадарный метод (Ground penetrating radar, GPR), основана на излучении и регистрации высокочастотных радиоволн, которые проходят через слой дамб и хвостов и отражаются от различных геологических структур. Георадиолокация эффективна для картирования подземных структур и выявления зон повышенной влажности, а также дает качественные результаты по структурной целостности герметизирующего слоя в отходах горно-рудного производства [47]. Метод предпочтителен для анализа приповерхностных структур (1-2 м) [47]. На территориях холодных климатических зон может использоваться для определения глубины (до 15-30 м) многолетнемерзлых пород, выделения таликов с анализом влажности сезонно-талого слоя, анализа мощности растительного и снежного покрова, мониторинга положения кровли мерзлоты, но неприменим для анализа глинистых, илистых и засоленных грунтов [7, 37]. Преимуществом георадарного метода на плоской поверхности является простота в обращении, хотя на крутых уступах реализация достоверного измерения оказывается сложнее.

Георадиолокация представляет интерес для исследований отходов горно-рудного производства на территориях холодных климатических зон. В частности, метод использовался на о-ве Шпицберген для регистрации пространственных и временных изменений состояния многолетнемерзлых пород в разные сезоны и идентификации уровня грунтовых вод [48]. Использование георадиолокации для исследований складированных отходов отражено в работе по анализу свойств отвалов дражной разработки при золоторудной добыче в Якутии [49]. Зондирование проводилось в зимний и летний периоды с оценкой слоев отвала до 8 м вглубь. Характеристики волновых полей использовались для обнаружения морфоструктурных неоднородностей в строении отвалов, проведения пространственного анализа для определения границ слоев различных отходов, криогенных структур.



Определялось наличие металлических включений, участков валунов и зон высокой влажности. Незагрязненные грунты характеризовались ровными георадиолокационными трассами с ровными временными задержками и сигналами с равномерной амплитудой в отличие от отвальных пород. Галечный слой на радиограмме выражен большим числом гипербола, а зоны повышенной влажности – непрерывными осями синфазности, образованными высокоамплитудными отраженными сигналами.

На хвостохранилище ГОКа в Мурманской обл. георадиолокация применялась для оценки степени деформации и утечек [36]. Анализ скорости электромагнитной волны позволил выявить зональную фильтрационную неоднородность грунтов, провести их категорирование, определить водонасыщенные грунты и уточнить структуру ограждающей дамбы. Зондирование проводилось ежегодно в осенний период, глубина зондирования достигала 30 м при использовании экранированных антенн с частотой сигнала 100 МГц. Пониженные скорости электромагнитных волн свидетельствовали о наличии влажных грунтов, тогда как под ними обнаруживались более плотные и сухие грунты, характеризующиеся повышением скоростей волны. Систематичность мониторинга позволила отследить процесс деградации дамбы во времени.

За рубежом георадиолокация применялась на хвостохранилище медно-вольфрамового рудника в Швеции, где она позволила определить уровень грунтовых вод и получить данные по вертикальному и латеральному распределению хвостов [50].

Электромагнитное профилирование (Electromagnetic survey, ES) позволяет получать в каждой точке профиля информацию об электромагнитных свойствах среды на одной глубине. Для этого выбираются постоянные или маломеняющиеся разности между питающими или приемными линиями, а также изучаемые частоты или времена переходного процесса. В результате интерпретации материалов электромагнитного профилирования выявляются аномальные по электромагнитным свойствам участки.

Впервые метод электромагнитного профилирования был применен авторами на первых этапах исследований техногенного объекта для выявления зон с контрастными сопротивлениями среды и планирования расположения профилей электротомографии в хранилище отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская обл.) [40]. Позднее на отвалах Белоключевского месторождения золота (Кемеровская обл.) была отработана методика совместного применения электромагнитного профилирования и площадной геохимической съемки для локализации зон максимального скопления хвостового материала с повышенными концентрациями металлов.

В рамках финской Программы по обнаружению и мониторингу загрязненных вод в шахтах была исследована эффективность метода электромагнитного профилирования. Подход применялся для наблюдения за территорией хвостохранилища. Было показано, что зоны изменения электропроводности хорошо коррелируют с результатами прямого отбора проб электролита из грунтовых вод. Проведенный мониторинг также помог в размещении новых водозаборных труб [51].

Электротомография (ЭТ, Electrical resistivity tomography, ERT / Electrical resistivity imaging, ERI) является основным методом геофизических измерений для исследования приповерхностных структур благодаря простоте и быстрым результатам [44]. Метод представляет собой комбинацию электрического зондирования и профилирования и позволяет получать двумерное и трехмерное геоэлектрическое строение среды. Суть методики измерений заключается в многократном использовании в качестве питающих и измерительных одних и тех же электродов, расположенных на профиле наблюдений. Разнос установки (расстояние между приемными и питающими электродами) влияет на глубину исследования и разрешающую способность. Детали метода описаны во многих работах и нередко сопровождаются открытыми программными кодами [32, 44].

При мониторинге учитывают взаимосвязь удельного электрического сопротивления и уникальных для каждого хвостохранилища физико-химических, петрофизических параметров и химического состава: солености и кислотности поровой воды, влажности, температуры, гранулометрического состава, текстуры, пористости, проницаемости, степени трещиноватости. Визуализация результатов чаще всего производится в виде 2D-разреза, хотя в последнее время появляются все более сложные, в том числе четырехмерные, модели [33].

Электротомография в наибольшей мере применима к исследованию объектов в суровых климатических условиях из-за возможности автономной настройки, снижающей стоимость работ [32, 37]. При оценке перспективности использования метода для мониторинга важно учитывать результаты



общих геофизических исследований на территориях холодных климатических зон, где изучается воздействие климатических условий на подземные процессы.

Поскольку деградация льдов и мерзлых пород может нести опасность стабильности хранилищ отходов, значимой представляется оценка границ, толщины и боковой непрерывности мерзлой области, а также изменений в толщине поверхностного слоя таяния. Вызывают интерес многолетние электротомографические исследования, выявившие рост объемов незамерзшей воды за последние 20 лет на европейских территориях холодных климатических зон, где было зафиксировано общее снижение УЭС за анализируемый период [31, 43].

В мониторинге хвостохранилищ электротомография дает высококачественные результаты, поскольку большинство хвостов являются электропроводящими относительно рыхлых отложений или коренных пород, в углублениях которых они находятся [44]. С помощью электротомографии возможно решение следующих задач:

- определение геометрии, границ и литологической структуры хвостохранилищ, морфологии контакта отходов и коренной породы, обнаружение потенциально трещиноватых зон в подстилающих породах;
- оценка объема хвостов и локализация зон окисления;
- выявление путей миграции дренажных растворов и их объема.

Динамический анализ кроме выявления путей просачивания дает возможность оценки его скорости и позволяет фиксировать происходящие в хвостах реакции, связанные с изменениями внешних условий.

В число лидеров в изучении складированных отходов добычи и обогащения руд входят исследования институтов Сибирского отделения РАН. Первые работы, заключающиеся в зондировании техногенного объекта методом электротомографии, построении двумерных геоэлектрических разрезов и прогнозе распространения подземного дренажа, были проведены на хранилище отходов Беловского цинкового завода (Кемеровская обл.) и продолжены на хранилищах Дюков Лог Салаирского горно-обогатительного комбината (Кемеровская обл.) [41] и отходах Карабашского медеплавильного завода в долине р. Сак-Элга (Челябинская обл.) [45]. Работы по уточнению взаимосвязей электрофизических, петрофизических и геохимических параметров среды продолжились в 2016 г., развитие получили методы микроэлектротомографии, динамической (тайм-лапс) электротомографии для исследования процессов, протекающих в системе «хвосты – поровый раствор – газ», и описания гиперкриогенеза [19, 52]. Сотрудничество специалистов в области геохимии и геофизики привело к развитию аппаратно-методического обеспечения и формированию концепции комплексного исследования техногенных систем [46, 53].

Высокая эффективность электротомографии в исследовании нескольких некультивированных полигонов Сибири и Дальнего Востока показана в работе [7], где выявлена однородность распределения УЭС для складированных отходов, что позволило обнаружить необработанные и целиковые участки с аномально высоким сопротивлением в их верхней части. За рубежом электротомография использовалась на финском хвостохранилище, где позволила обозначить стратиграфический профиль области хвостохранилища с дальнейшим определением фаций, очертить уровень грунтовых вод, показать пути потоков высокоминерализованного подземного дренажа и разграничить насыщенные и ненасыщенные зоны [54].

Тайм-лапс электротомография (Time-lapse electrical resistivity tomography, TL-ERT) является активно развивающимся подвидом электротомографии и применима к различным видам геофизического мониторинга – гидрогеотермальному, геотехническому и экологическому. Каждое мониторинговое обследование TL-ERT описывается двумя группами параметров: к пространственным относятся протяженность, глубина исследования и пространственное разрешение, к временным – период мониторинга и временное разрешение. Подробный обзор использования метода с акцентом на анализе складированных отходов был выполнен на богатом материале канадских горно-добывающих предприятий [38]. На территориях холодных климатических зон в последние годы TL-ERT применялась в исследовании складированных отходов Салаирского месторождения (Кемеровская обл.). Было показано, как суточные температурные колебания воздуха, а затем и почвы взаимосвязаны с интенсивностью газогенерации и вариациями значений УЭС [9]. Показаны суточная и сезонная вариации электропроводности минерализованного порового раствора, выявлены



концентрации газа в приповерхностном слое воздуха в зависимости от изменения параметров окружающей среды. Изменения УЭС в течение суток могут достигать 8 %, при этом они будут различаться в разных частях хвостохранилищ в зависимости от влажности и гранулометрического состава вещества отходов.

Микроэлектротомография является другим подвидом электротомографии, позволяющим определить состояние подповерхностного пространства и установить корреляцию между электрофизическими параметрами и структурой изучаемых техногенных отложений. Ее особенностями являются небольшое расстояние между электродами (30 см) в сравнении с обычными измерениями и возможность детализации геоэлектрического разреза с шагом в 15 см по глубине. Микроэлектротомография позволила выявить геохимические барьеры и локализовать зоны активного гиперкриогенеза на хранилище отходов Дарасунского рудного узла (Забайкальский край) [19].

Электротомография методом вызванной поляризации (ЭТ ВП) или спектральной вызванной поляризации (Spectral induced polarization, SIP) – усовершенствованный подвид электротомографии с переменным током, который в дополнение к УЭС регистрирует смещение фаз между введенным током и измеренным сигналом. При этом фазовый сигнал различается в разных фракциях хвостов, например с увеличением содержания металлов фазовый эффект также растет. Такое смещение предоставляет информацию о концентрациях рассеянных рудных минералов. Его можно применять для количественной оценки объемов складированных отходов, определения их точных границ [47], устанавливая присутствие зон золотосульфидной минерализации [7]. Метод имеет потенциал для характеристики шлаковых отвалов в случае наличия рудных минералов в отходах. Детали метода применительно к оценке мерзлых пород и льда раскрываются в работе [55].

Сейсмические методы. Сейсмические методы применительно к изучению складированных отходов на территориях холодных климатических зон используются реже электромагнитных методов. Однако они могут дать много полезной информации, в особенности для оценки устойчивости ограждающих сооружений на горно-добывающих предприятиях. Сбор сейсмических данных становится актуален даже в несейсмических регионах, поскольку сами горные работы становятся источниками сейсмических событий из-за перераспределения напряжений и нарушения баланса в различных слоях геосреды при извлечении руды. Эти события могут нарушать целостность хвостов и их ограждений и способствовать выходу поллютантов в окружающую среду.

Сейсморазведка (Seismic survey) основана на изучении особенностей распространения упругих сейсмических волн в горных породах. Вызванные искусственным источником, упругие колебания распространяются в толще земной коры. Там они претерпевают отражение и преломление на границах с различными упругими свойствами и частично возвращаются к дневной поверхности, где регистрируются сейсмической аппаратурой.

Скорости распространения сейсмических волн в различных горных породах могут изменяться в широких пределах. Это объясняется тем, что на упругие свойства горных пород влияет большое число геологических и физических факторов: плотность, пористость, тип порового флюида, трещиноватость, глубина залегания, пластовое давление, возраст, температура горных пород.

На границах слоев, где упругие свойства меняются, могут образоваться отраженные, преломленные, рефрагированные, дифрагированные и другие волны, при регистрации которых на земной поверхности можно получить информацию о скоростном разрезе и по нему судить о геологическом строении. В сейсморазведке различают два основных метода – отраженных и преломленных волн. Меньшее применение находят методы, использующие другие виды волн.

Метод отраженных волн (МОВ, Reflection seismic survey) основан на использовании волн, отраженных от границ сред с различной акустической жесткостью. Условием образования отраженной волны является разность акустических жесткостей (произведения плотности на скорость) сверху и снизу от границы раздела.

Многие месторождения металлов имеют достаточные контрасты физических свойств, в частности плотности, поэтому их можно обнаружить с помощью сейсмических методов. Метод 3D-сейсморазведки на отраженных волнах успешно применялся в Швеции на руднике Блетбергет для поиска залежей оксида железа и вмещающих его пород [56]. В работе была продемонстрирована применимость метода к определению границ техногенных отложений для одного из старых хвостохранилищ.



Метод преломленных волн (МПВ, Refraction seismic survey) является подходящим методом сейсморазведки для исследования складированных отходов. Метод использует преломленные волны, образующиеся при разности скоростей сверху и снизу границы раздела сред. Таким образом, МПВ будет эффективно работать в случае высокой контрастности двух слоев и хорошо подойдет для определения уровня грунтовых вод, картирования кровли многолетнемерзлых пород, описания внутренней структуры хвостохранилищ. Метод позволяет эффективно обнаружить подстилающий грунт более высокой плотности из хвостовой среды, подходит для оконтуривания зон путей миграции дренажных потоков, поиска потенциальных нарушений в дамбах.

На территориях холодных климатических зон МПВ применялся в Финляндии для последующего стратиграфического и фациального анализа хвостохранилищ. МПВ помог оценить глубины подстилающего грунта и коренных пород в области хвостохранилища и определить его геометрию. Дальнейшая интерпретация полученных результатов совместно с данными электротомографии позволила сегментировать область хвостохранилища на интерпретируемые зоны или фации, оценить уровень грунтовых вод [54].

Сейсмическая томография (Seismic tomography, ST) заключается в определении непрерывного 2D- и 3D-распределения сейсмических свойств среды на основе данных о временах пробега упругих волн [57]. Метод положительно зарекомендовал себя в региональной и глобальной сейсмологии, где широко применяется для получения скоростных моделей земной коры и мантии. При проведении сейсморазведочных работ метод используется для построения скоростной модели верхней части разреза, где осложняющим фактором может быть наличие высокоскоростных слоев многолетнемерзлых пород [58].

Метод сейсмической томографии имеет хорошие перспективы для применения на территориях холодных климатических зон, поскольку сейсмические свойства активно меняются в характерных для этих регионов циклах замерзания – оттаивания. Метод позволяет проводить оценку скоростей сейсмических волн, которые будут различаться для замерзших и незамерзших грунтов [59]. Изменения скорости в каменном глетчере и многолетней мерзлоте в основном зависят от пористости осадков и их насыщенности воздухом, льдом или водой и поэтому более отчетливы в крупнозернистых грунтах. Отмечается рост скоростей *P*-волн в направлении от активного слоя каменного глетчера к зонам вечной мерзлоты.

В анализируемый период данных по применению сейсмической томографии в исследовании складированных отходов не было, однако на территориях холодных климатических зон метод использовался в сети RASE для анализа деградации многолетнемерзлых грунтов в Альпах и на территории Норвегии [31]. Также сейсмическая томография применялась для количественной оценки содержания подземного льда и толщины мерзлоты в высокогорных регионах Центральных Анд [39, 59]. Таким образом, эффективность использования метода в локациях с суровым климатом указывает на перспективы его использования применительно к складированным отходам горно-рудных производств.

Шумовая интерферометрия (Ambient noise interferometry, ANI) – сейсмический метод мониторинга вулканов, оползней и плотин, редко применяемый для анализа складированных отходов. Метод основан на выявлении сейсмических волн из кросс-корреляции сейсмического шума [60]. Построение функции кросс-корреляции сейсмического шума позволяет восстановить функцию Грина между двумя сейсмическими станциями, при этом одна из станций выступает в качестве виртуального источника волн, а другая – в качестве приемника. Метод не требует высокой вычислительной мощности и может использоваться для эффективной обработки данных при постоянном мониторинге. В исследовании складированных отходов шумовая интерферометрия может быть полезна для извлечения объемных поперечных волн. Скорость распространения поперечных волн взаимосвязана с жесткостью грунта и может использоваться для оценки других геотехнических параметров – напряженного состояния, сопротивления разжижению и степени цементации. Таким образом, данный подход применим к обнаружению потенциальных причин разрушений ограждающих сооружений.

Стандартная обработка методом ANI применялась для мониторинга хвостохранилища в Северной Канаде, где изменения сейсмической скорости менее чем на 1 % показали сильную корреляцию с изменениями уровня воды в соседнем хвостохранилище, а также была установлена связь с выпадением осадков в период наблюдений [60]. Пассивная сейсмическая интерферометрия



использовалась для оценки сейсмических скоростей в районе хвостохранилища и в приповерхностных породах на горно-добывающих участках в Финляндии [61]. Результаты позволили уточнить структуру хвостов, их физическое и геотехническое состояние. Представлен потенциал шумовой интерферометрии для оповещений о потенциальных проблемных областях путем установления порогового уровня срабатывания на основе сезонных колебаний.

Сейсмостатическое зондирование (Seismic cone penetration test, SCPT) направлено на измерение давления поровой воды и скорости сейсмических волн. Анализ распределения скорости волны в зависимости от глубины профиля позволяет выделить зоны грунта с различной степенью насыщения. Поэтому сейсмостатическое зондирование хорошо подходит как для оценки степени разжижения складированных отходов с целью его предотвращения, так и для анализа устойчивости ограждающих сооружений [60]. Может также использоваться для оценки водного режима хвостов, распределения порового давления воды и насыщенности. Метод применялся в исследовании хвостохранилищ флотационного обогащения медной руды в Польше [62].

Магнитометрические методы (магниторазведка) основаны на измерении магнитного поля Земли и его вариаций. На значения измеряемых параметров влияет интенсивность намагничивания геологических формаций, обусловленная разными магнитными свойствами пород (аномальное поле). Магниторазведку часто проводят совместно с одним или несколькими электроразведочными методами. Хотя информации по использованию магнитометрических методов на территориях холодных климатических зон не нашлось, тем не менее методика представляется перспективной и для этих территорий, поскольку активно применяется для изучения отвальных отходов переработки и оценки риска загрязнения тяжелыми металлами на месторождениях.

В работе [63] рассмотрен пример длительной эксплуатации рудного месторождения в Польше, которая привела к образованию около 60 млн т отходов. В окрестностях хвостохранилища развились процессы кислотного дренажа в результате загрязнения почв и грунтовых вод. Для мониторинга процессов в хвостохранилище было предложено использовать комплекс геофизических методов: малоуглубинной магнитометрической съемки, электротомографии и электромагнитного профилирования. Электроразведочные методы позволили выявить распространение зон загрязнения вокруг хвостохранилища. Магнитометрия оказалась хорошим инструментом для выявления сред, загрязненных нестабильными металлсодержащими минералами, позволив определить дальность распространения пыли от хвостохранилища.

Аварии, связанные с утечкой фильтрата из хвостохранилищ, вызывают серьезные загрязнения окружающей среды. В Китае [64] рассматривалось использование аэромагнитной съемки для уточнения информации об утечке фильтрата из хвостохранилища. В результате аэромагнитной съемки были определены четыре разломные зоны, сформированные вокруг хвостохранилища. Один из разломов служил каналом для утечки фильтрата, что привело к его дальнейшему попаданию в грунтовые воды через сеть трещин. Методика помогла выявить механизм миграции фильтрата из хвостохранилища и проанализировать источники загрязнения водной среды.

Еще один редко встречающийся метод основан на магниторезистивном эффекте – изменении электрического сопротивления материала в магнитном поле (Magnetometric resistivity method, MMR). Хотя данный эффект уже хорошо изучен, он пока не нашел широкого применения в геофизике, особенно российской. Подход MMR состоит из введения тока известной величины и частоты в грунт и регистрации компонент вызванного магнитного поля с помощью магнитных датчиков на поверхности. В области гидрогеофизики метод нашел применение для обнаружения механизмов переноса растворенных веществ на небольшой глубине и загрязнения грунтовых вод. MMR используется для определения и картирования путей потока грунтовых вод. Проводимость путей потока грунтовых вод намного выше фоновой проводимости из-за их высокой минерализации. Например, в Китае данный метод использовался для определения путей утечки в районе земляных насыпей для снижения риска неустойчивости их конструкций [65].

Рентгеновская томография (X-ray tomography) позволяет исследовать керн с помощью рентгеновского излучения. За основу берутся различия в плотности горной породы, минеральных включений, пустот, трещин и заполняющих их пластовых флюидов. На выходе получаются снимки, представляющие собой полутоновые изображения, яркость которых характеризует степень поглощения рентгеновского излучения. Затем реконструируется объемная трехмерная модель



образца, что позволяет судить о структуре матрицы горной породы и распределении поровых каналов. Практическое применение данного метода довольно редко встречается при исследовании хвостохранилищ.

В условиях холодных климатических зон рентгеновская томография применялась для анализа затвердевших слоев одного из сульфидных хвостохранилищ в канадской провинции Квебек [25]. С помощью рентгеновского микроскопа была исследована пористость затвердевших слоев, подтердившая иммобилизацию загрязнителей.

Ядерные методы. Ядерная геофизика объединяет физические методы поисков и разведки радиоактивных руд по их естественной радиоактивности (радиометрия) и поэлементного анализа горных пород путем изучения вызванной радиоактивности (ядерно-геофизические методы). Ядерные методы редко используются, однако имеют перспективы для исследования хвостохранилищ в холодных климатических зонах. В Норвегии радиационные методы использовались для отслеживания процесса выщелачивания Mn и Zn из титановой руды, хвостов добычи Cu и хвостов добычи Zn-Pb [66]. Была предложена методика нейтронно-активационного анализа для определения концентраций элементов в образце. Обнаружено, что выщелачивание Zn возрастает с увеличением времени выщелачивания. Выщелачивание Mn увеличивается со временем, концентрацией HCl и повышением температуры.

В России сведений об использовании метода в холодной климатической зоне за анализируемый период не было. Однако он применялся в Ставропольском крае, где исследовалась радиационная обстановка на отвалах рудника № 1 ЛПО «Алмаз» по добыче и переработке урановых руд через пять лет после проведения рекультивации [67]. Метод радиометрии использовался для мониторинга мощности гамма-излучения после рекультивации штолен. Радиометрия основывается на разной радиоактивности руд и пород, а также на миграции радиоактивных элементов и продуктов распада в подземных водах и подпочвенном воздухе. Из всех видов радиоактивных излучений наибольшей проникающей способностью обладают гамма-кванты, поэтому в основном используются методы гамма-съемки. Эти методы предназначены для изучения интенсивности естественного гамма-излучения. Метод радиометрии может быть использован для мониторинга за состоянием отвалов после добычи радиоактивной руды.

Заключение

Систематический мониторинг с использованием широкого спектра геофизического оборудования и подходов остается базовым инструментом в управлении хранилищ складированных отходов горно-рудного производства. Результаты геофизических исследований способствуют решению множества задач, включая оценку опасности отходов, обеспечение устойчивости ограждающих сооружений, исследование возможностей рекультивации либо вторичного использования таких объектов. Основные проблемы и ограничения применения геофизических методов для изучения хранилищ складированных отходов в районах с резко континентальным климатом – низкие температуры ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) выводят из строя электронику в составе аппаратуры, сезонные циклы замораживания – оттаивания сульфидсодержащего хвостового материала приводят к интенсивному окислению вещества и выщелачиванию металлов, удаленность объектов, отсутствие инфраструктуры и короткий полевой сезон (3-4 мес.) затрудняют организацию работ. Основные геофизические методы, используемые для изучения хранилищ отходов горно-рудного производства в холодных климатических зонах:

- электромагнитные – электромагнитное зондирование методом переходных процессов, георадиолокация, электромагнитное профилирование, электротомография, тайм-лапс электротомография, микроэлектротомография, электротомография методом вызванной поляризации;
- сейсмические – метод отраженных волн, метод преломленных волн, сейсмическая томография, шумовая интерферометрия, сейсмостатическое зондирование;
- магнитометрические;
- рентгеновская томография;
- ядерная геофизика.

Преимущества применения геофизических методов при исследовании складированных отходов добычи и обогащения руд:

- оперативный сбор информации для оценки границ техногенных отложений;



- оптимизация системы геохимического мониторинга, в том числе за счет сокращения числа точек опробования;
- оценка объемов отходов;
- картирование области фильтрации подземных дренажных растворов;
- локализация мест утечек фильтратов и загрязнения подземных вод.

Перспективы развития геофизических методов связаны с разработкой комплексных подходов на основе методов электроразведки, сейсмотомографии, аэрофотосъемки с верификацией геохимическим опробованием для исследования складированных отходов горно-рудного производства, что в конечном итоге приведет к повышению точности интерпретации геоэлектрических и структурных моделей техногенных объектов и позволит решать новые актуальные задачи. К ним относятся поиск геохимических барьеров-концентраторов металлов, оконтуривание зон окисления сульфидных минералов, локализация областей деградации многолетнемерзлых пород за счет действия подземного кислотного дренажа, определение сезонной динамики техногенного тела с установлением общего количества выделяемого тепла и объемов парниковых и серосодержащих газов.

Ограничения и перспективы исследования. Несмотря на продемонстрированные в работе широкие возможности использования геофизических методов для мониторинга складированных отходов горно-рудного производства, во многом подтвержденные реальной практикой их применения, трудности возникают при попытке провести ранжирование среди самих обозначенных подходов и выявить среди них наиболее перспективные. Это в значительной степени связано с частой недоступностью информации по используемым методикам, планам их модернизации, комплексирования или замены, что обусловлено коммерческим характером этих данных и существующей конкуренцией в горно-добывающей промышленности. Кроме того, технологические инновации, кроме журнальных статей и материалов конференций, нередко отражаются в таких специфических типах документов, как отчеты и патенты, которые не были охвачены в текущей работе. Включение в последующий анализ этих дополнительных источников данных в совокупности с исследованием государственных программ в области экологии и горно-добывающей отрасли может дать возможность количественно оценить перспективы применения тех или иных геофизических методов и потребностей в них в России.

Важно отметить, что использование геофизических методов в перспективе может значительно уменьшить затраты на проведение мониторинга складированных отходов горно-рудного производства, в частности в сравнении с бурением наблюдательных скважин для этих же целей. Однако уже на этапе выбора конкретных геофизических методов необходимо учитывать финансовые затраты на проведение разных видов работ, что также может являться значимым показателем в оценке перспективности использования того или иного метода в будущем. Например, комплекс факторов, таких как дороговизна оборудования, трудоемкость, сложность логистики и обработки данных, делает проведение сейсморазведочных работ более финансово затратными, чем, например, электромагнитных работ. Это обстоятельство может являться существенным аргументом в пользу предпочтения электромагнитных исследований, что отражено в большом количестве современных научных публикаций. В любом случае конечный выбор метода зависит от задач исследования, требуемой глубинности, геологических условий, необходимой точности, а также экономической оценки целесообразности использования метода в каждом конкретном случае.

На основе информации из научных источников можно заключить, что дальнейшее развитие геофизических методов исследования хранилищ отходов горно-рудного производства в России может быть связано с разработкой мобильных комплексов для электроразведки, адаптированных к температурам до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с использованием дронов с гиперспектральными камерами, интеграцией данных дистанционного зондирования (Landsat, Sentinel) с полевыми геохимическими пробами, внедрением алгоритмов искусственного интеллекта для обработки геофизических данных. Для успешных исследований техногенных систем в холодных условиях критически важны адаптация методов под локальные особенности климата и междисциплинарный подход.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ду Я., Се Б., Малларни Б., Чжан Ч. Консолидация мелкозернистых хвостов и зонирование профиля хвостохранилищ // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. Т. 56. № 5. С. 359-365.
2. Yulia Mun, Palinkaš S.S., Forwick M. et al. Stability of Cu-Sulfides in Submarine Tailing Disposals: A Case Study from Repparfjorden, Northern Norway // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 2. № 169. DOI: [10.3390/min10020169](https://doi.org/10.3390/min10020169)
3. Andersson M., Finne T.E., Jensen L.K., Eggen O.A. Geochemistry of a copper mine tailings deposit in Repparfjorden, northern Norway // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 644. P. 1219-1231. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.06.385](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.385)
4. Ramirez-Llodra E., Trannum H.C., Evenset A. et al. Submarine and deep-sea mine tailing placements: A review of current practices, environmental issues, natural analogs and knowledge gaps in Norway and internationally // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 97. Iss. 1-2. P. 13-35. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2015.05.062](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.062)
5. Robertson J., Hendry M.J., Kotzer T., Hughes K.A. Geochemistry of uranium mill tailings in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada: A review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2019. Vol. 49. Iss. 14. P. 1237-1293. DOI: [10.1080/10643389.2019.1571352](https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1571352)
6. Costis S., Coudert L., Mueller K.K. et al. Assessment of the leaching potential of flotation tailings from rare earth mineral extraction in cold climates // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 732. № 139225. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.139225](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139225)
7. Осипова П.С., Оленченко В.В., Калганов А.С., Чекрыжов А.В. Геоэлектрические признаки рекультивированных отработанных россыпных месторождений золота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 5. С. 158-167. DOI: [10.18799/24131830/2022/5/3504](https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3504)
8. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г., Понов В.Ф., Макаров В.С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 212-225. DOI: [10.31897/PMI.2023.35](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.35)
9. Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V. et al. 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](https://doi.org/10.32389/JEEG21-004)
10. Зверева В.П., Фролов К.Р., Пятаков А.Д. Моделирование процессов окисления сульфидов на хвостохранилище месторождения Высокогорское при температуре от -25 до 0 °С (Кавалеровский район Приморского края) // Экологическая химия. 2018. Т. 27. № 3. С. 135-140.
11. Jouini M., Neculita C.M., Genty T., Benzaazoua M. Freezing/thawing effects on geochemical behavior of residues from acid mine drainage passive treatment systems // Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 33. № 101087. DOI: [10.1016/j.jwpe.2019.101087](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101087)
12. Qureshi A., Bussièrè B., Benzaazoua M. et al. Geochemical Assessment of Desulfurized Tailings as Cover Material in Cold Climates // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 3. № 280. DOI: [10.3390/min11030280](https://doi.org/10.3390/min11030280)
13. Schudel G., Plante B., Bussièrè B. et al. Sulfide oxidation during the simulated weathering of pyrrhotite-rich tailings: Impacts of freeze-thaw cycles and chloride salinity // Cold Regions Science and Technology. 2019. Vol. 209. № 103802. DOI: [10.1016/j.coldregions.2023.103802](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103802)
14. Tulisova K., Olenchenko V., Sigachev N. et al. Engineering and Geophysical Research of the Tailing Dump under the Conditions of Growing Soils of the Base // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 7. № 4242. DOI: [10.3390/app13074242](https://doi.org/10.3390/app13074242)
15. Roy T., Plante B., Demers I. et al. Multi-year in situ hydrogeochemical monitoring of hard rock lithium mine tailings in a large-scale experimental pile // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 356. № 120602. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.120602](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120602)
16. Berryman E.J., Cleaver A., Martineau C. et al. Capture and characterization of fugitive mine dust around an open pit gold mine in Québec, Canada // Applied Geochemistry. 2024. Vol. 171. № 106099. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2024.106099](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106099)
17. Miller C.B., Parsons M.B., Jamieson H.E. et al. Lake-specific controls on the long-term stability of mining-related, legacy arsenic contamination and geochemical baselines in a changing northern environment, Tundra Mine, Northwest Territories, Canada // Applied Geochemistry. 2019. Vol. 109. № 104403. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2019.104403](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104403)
18. Costis S., Coudert L., Mueller K.K. et al. Impact of freeze-thaw on the behaviour of flotation tailings from a rare earth deposit // Applied Geochemistry. 2021. Vol. 135. № 105106. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2021.105106](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105106)
19. Yurkevich N., Olenchenko V., Bortnikova S. et al. Cyanides, Arsenic, and Noble Metals in Abandoned Gold Ore Cyanidation Tailings and Surface Waters in a Permafrost Region (Transbaikal Territory, Russia) // Mine Water and the Environment. 2021. Vol. 40. Iss. 4. P. 943-955. DOI: [10.1007/s10230-021-00828-5](https://doi.org/10.1007/s10230-021-00828-5)
20. Мякая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю. Влияние отрицательных температур на окислительное выщелачивание элементов из высокосульфидных отходов обогащения // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 76-92. DOI: [10.17223/25421379/24/5](https://doi.org/10.17223/25421379/24/5)
21. Farzamian M., Vieira G., Monteiro Santos F.A. et al. Detailed detection of active layer freeze-thaw dynamics using quasi-continuous electrical resistivity tomography (Deception Island, Antarctica) // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. Iss. 3. P. 1105-1120. DOI: [10.5194/tc-14-1105-2020](https://doi.org/10.5194/tc-14-1105-2020)
22. Zhongwen Bao, Bain J., Holland S.P. et al. Hydrogeochemical Response of a Variably Saturated Sulfide-Bearing Mine Waste-Rock Pile to Precipitation: A Field-Scale Study in the Discontinuous Permafrost Region of Northern Canada // Water Resources Research. 2022. Vol. 58. Iss. 1. № e2021WR031082. DOI: [10.1029/2021WR031082](https://doi.org/10.1029/2021WR031082)
23. Uhlemann S., Dafflon B., Peterson J. et al. Geophysical Monitoring Shows that Spatial Heterogeneity in Thermohydrological Dynamics Reshapes a Transitional Permafrost System // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48. Iss. 6. № e2020GL091149. DOI: [10.1029/2020GL091149](https://doi.org/10.1029/2020GL091149)
24. Desbarats A.J., Percival J.B., Bilot I. et al. Drainage chemistry of mine tailings from a carbonatite-hosted Nb-REE deposit, Oka, Québec, Canada // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 138. № 105216. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2022.105216](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105216)
25. Elghali A., Benzaazoua M., Bussièrè B. et al. The role of hardpan formation on the reactivity of sulfidic mine tailings: A case study at Joutel mine (Québec) // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 654. P. 118-128. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.066](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.066)
26. Sapkota B., Verbuyst B., Bain J. et al. Geochemical and mineralogical investigation of cemented crusts in the tailings cover at Long Lake Gold Mine, Sudbury, Canada // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 451. № 131192. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2023.131192](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131192)
27. Savage R.J., Pearce S., Mueller S. et al. Methods for assessing acid and metalliferous drainage mitigation and carbon sequestration in mine waste: a case study from Kevitsa mine, Finland // Mine Closure 2019: Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure, 3-5 September 2019, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 1073-1086. DOI: [10.36487/ACG_rep/1915_86_Savage](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_86_Savage)



28. *Gras A., Beaudoin G., Molson J., Plante B.* Atmospheric carbon sequestration in ultramafic mining residues and impacts on leachate water chemistry at the Dumont Nickel Project, Quebec, Canada // *Chemical Geology*. 2020. Vol. 546. № 119661. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2020.119661](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119661)
29. *Kalitina E.G., Kharitonova N.A., Kuzmina T.V.* Chemical and Microbiological Composition of Technogenic Waters in the Tailing Dumps of Krasnorechensk Ore-dressing Plant (Primorsky Krai, Russia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 272. Iss. 3. № 032057. DOI: [10.1088/1755-1315/272/3/032057](https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032057)
30. *Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A. et al.* The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. № 168. DOI: [10.1038/s43247-022-00498-3](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3)
31. *Etzelmüller B., Guglielmin M., Hauck C. et al.* Twenty years of European mountain permafrost dynamics—the PACE legacy // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15. № 10. № 104070. DOI: [10.1088/1748-9326/abae9d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae9d)
32. *Farzamian M., Blanchy G., McLachlan P. et al.* Advancing Permafrost Monitoring With Autonomous Electrical Resistivity Tomography (A-ERT): Low-Cost Instrumentation and Open-Source Data Processing Tool // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51. Iss. 6. № e2023GL105770. DOI: [10.1029/2023GL105770](https://doi.org/10.1029/2023GL105770)
33. *Scandroglia R., Draebing D., Offer M., Krautblatter M.* 4D quantification of alpine permafrost degradation in steep rock walls using a laboratory-calibrated electrical resistivity tomography approach // *Near Surface Geophysics*. 2021. Vol. 19. Iss. 2. P. 241-260. DOI: [10.1002/nsg.12149](https://doi.org/10.1002/nsg.12149)
34. *Karmanovskaya N.V., Smirnova A.T., Litovchenko V.I., Efa S.G.* Automated systems of ecological control in Norilsk // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 734. № 012175. DOI: [10.1088/1757-899X/734/1/012175](https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012175)
35. *Blanchy G., Saneiyani S., Boyd J. et al.* ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling // *Computers & Geosciences*. 2020. Vol. 137. № 104423. DOI: [10.1016/j.cageo.2020.104423](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104423)
36. *Максимов Д.А., Дьяков А.Ю.* Мониторинг локальных нарушений фильтрационных процессов в дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий комплексом геофизических и визуальных методов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 8. С. 154-163. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_8_0_154](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_154)
37. *Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А. и др.* Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2022. № 6. С. 141-151. DOI: [10.33623/0579-9406-2022-6-141-151](https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151)
38. *Dimech A., LiZhen Cheng, Chouteau M. et al.* A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years: Perspectives for Mining Waste Monitoring // *Surveys in Geophysics*. 2022. Vol. 43. Iss. 6. P. 1699-1759. DOI: [10.1007/s10712-022-09731-2](https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2)
39. *Hilbich C., Hauck C., Mollaret C. et al.* Towards accurate quantification of ice content in permafrost of the Central Andes – Part 1: Geophysics-based estimates from three different regions // *The Cryosphere*. 2022. Vol. 16. Iss. 5. P. 1845-1872. DOI: [10.5194/tc-16-1845-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1845-2022)
40. *Yurkevich N.V., Abrosimova N.A., Bortnikova S.B. et al.* Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2017. Vol. 99. Iss. 9-10. P. 1328-1345. DOI: [10.1080/02772248.2017.1371308](https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1371308)
41. *Erov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B. et al.* Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58. Iss. 12. P. 1543-1552. DOI: [10.1016/j.rgg.2017.11.014](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.014)
42. *Оленченко В.В., Бортникова С.Б., Девятова А.Ю.* Применение электроразведочных методов при исследовании техногенных тел (складированных отходов горнорудной промышленности). Обзор // *Геофизические технологии*. 2022. № 4. С. 23-40. DOI: [10.18303/2619-1563-2022-4-23](https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-4-23)
43. *Mollaret C., Hilbich C., Pellet C. et al.* Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. Iss. 10. P. 2557-2578. DOI: [10.5194/tc-13-2557-2019](https://doi.org/10.5194/tc-13-2557-2019)
44. *Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T. et al.* Electrical Resistivity Imaging Applied to Tailings Ponds: An Overview // *Mine Water and the Environment*. 2021. Vol. 40. Iss. 1. P. 285-297. DOI: [10.1007/s10230-020-00741-3](https://doi.org/10.1007/s10230-020-00741-3)
45. *Yurkevich N.V., Saeva O.P., Karin Y.G.* Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia // *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2015. Vol. 97. Iss. 1. P. 76-89. DOI: [10.1080/02772248.2015.1041955](https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1041955)
46. *Юркевич Н.В.* Техногенные экосистемы: динамика развития и ресурсный потенциал (на примере хранилищ отходов горнорудного производства в Кемеровской области и Забайкальском крае): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 2024. 36 с.
47. *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. Iss. 2. P. 275-286. DOI: [10.2113/JEEG19-080](https://doi.org/10.2113/JEEG19-080)
48. *Izadi Yazdanabadi M., Marciniak A., Oryński S. et al.* Time-lapse GPR Measurements for Observing Shallow Cryo-Hydrogeological Borders in Spitsbergen's Fuglebekken Catchment // *EGU General Assembly*, 14-19 April 2024, Vienna, Austria. EGU, 2024. № EGU24-10315. DOI: [10.5194/egusphere-egu24-10315](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-10315)
49. *Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Поисеева С.И.* Исследование особенности строения техногенных отвалов методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 12-1. С. 243-254. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_12_1_243](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_1_243)
50. *Tavakoli S., Rasmussen T.M.* Geophysical tools to study the near-surface distribution of the tailings in the Smaltjärnen repository, south-central Sweden; a feasibility study // *Acta Geophysica*. 2022. Vol. 70. Iss. 1. P. 141-159. DOI: [10.1007/s11600-021-00697-0](https://doi.org/10.1007/s11600-021-00697-0)
51. *Saksa P.J.* Tailings Pond Outfiltration Monitoring with Electrical Conductivity Surveying // *First Break*. 2024. Vol. 42. Iss. 8. P. 111-117. DOI: [10.3997/1365-2397.fb2024072](https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024072)
52. *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. Iss. 1. P. 55-63. DOI: [10.2113/JEEG18-096](https://doi.org/10.2113/JEEG18-096)
53. *Карин Ю.Г.* Экспресс методика построения моделей для оценки объемов вещества хвостохранилищ по данным электротомографии, электромагнитного профилирования и аэрофотосъемки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, 2025. 23 с.
54. *Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J.P. et al.* 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](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104402)



55. Kozhevnikov N.O. On the association between fast induced polarization in frozen rocks and dielectric polarization of ice // Geophysical Prospecting. 2022. Vol. 70. Iss. 8. P. 1380-1387. DOI: [10.1111/1365-2478.13246](https://doi.org/10.1111/1365-2478.13246)
56. Malehmir A., Markovic M., Marsden P. et al. Sparse 3D reflection seismic survey for deep-targeting iron oxide deposits and their host rocks, Ludvika Mines, Sweden // Solid Earth. 2021. Vol. 12. Iss. 2. P. 483-502. DOI: [10.5194/se-12-483-2021](https://doi.org/10.5194/se-12-483-2021)
57. Nolet G. Seismic Tomography // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Springer, 2019. P. 1-5. DOI: [10.1007/978-3-030-10475-7_28-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_28-1)
58. Чернышов Г.С., Дучков А.А., Логинов Г.Н. и др. Подход к построению слоистой скоростной модели верхней части разреза по данным времен первых вступлений // Нефтяное хозяйство. 2022. № 1. С. 26-31. DOI: [10.24887/0028-2448-2022-1-26-31](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-1-26-31)
59. Halla C., Blöthe J.H., Tapia Baldis C. et al. Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina // The Cryosphere. 2021. Vol. 15. Iss. 2. P. 1187-1213. DOI: [10.5194/tc-15-1187-2021](https://doi.org/10.5194/tc-15-1187-2021)
60. Ouellet S.M., Dettmer J., Olivier G. et al. Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 301. DOI: [10.1038/s43247-022-00629-w](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00629-w)
61. Afonin N., Kozlovskaya E., Canales R.M. Application of passive seismic interferometry for mapping mining waste storage facilities: A case study of Pyhäsalmi mine in Finland // Journal of Applied Geophysics. 2022. Vol. 202. № 104669. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2022.104669](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104669)
62. Tschuschke W., Gogolik S., Wróżyńska M. et al. The Application of the Seismic Cone Penetration Test (SCPTU) in Tailings Water Conditions Monitoring // Water. 2020. Vol. 12. Iss. 3. № 737. DOI: [10.3390/w12030737](https://doi.org/10.3390/w12030737)
63. Pierwola J., Szuszkiewicz M., Cabala J. et al. 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. Iss. 14. P. 16731-16744. DOI: [10.1007/s11356-020-08195-4](https://doi.org/10.1007/s11356-020-08195-4)
64. Bowen Shi, Xixi Li, Weiwu Hu et al. Environmental risk of tailings pond leachate pollution: Traceable strategy for leakage channel and influence range of leachate // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 331. № 117341. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.117341](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117341)
65. Shuanggui Hu, Feiyan Wang, Jingtian Tang et al. Feasibility of induced magnetic gradient surveying for seepage detection in earth-filled dams: Insights from synthetic and field studies // Geophysics. 2024. Vol. 89. № 6. P. E229-E239. DOI: [10.1190/geo2024-0037.1](https://doi.org/10.1190/geo2024-0037.1)
66. Kiprono N.R., Kawalec A., Klis B. et al. Radiation Techniques for Tracking the Progress of the Hydrometallurgical Leaching Process: A Case Study of Mn and Zn // Metals. 2024. Vol. 14. Iss. 7. № 744. DOI: [10.3390/met14070744](https://doi.org/10.3390/met14070744)
67. Бельских Ю.С., Шандала Н.К., Титов А.В. и др. Исследование радиационной обстановки на отвалах рудника № 1 ЛПО «Алмаз» через 5 лет после проведения рекультивации // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 7. С. 736-740. DOI: [10.47470/0016-9900-2022-101-7-736-740](https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-7-736-740)

Авторы: **Наталья Викторовна Юркевич**, д-р геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Институт геологии и минералогии имени В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия), профессор (Институт экологии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия), доцент (Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8337-9148>, **Любовь Юрьевна Епонешникова**, младший научный сотрудник (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-6713-7480>, **Вадим Николаевич Гуреев**, канд. пед. наук, заведующий центром (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия), GureevVN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3460-0157>, **Николай Алексеевич Мазов**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-4607-1122>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.