

На правах рукописи



КАРИН Юрий Григорьевич

ЭКСПРЕСС МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ
МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ВЕЩЕСТВА
ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПО ДАННЫМ
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И
АЭРОФОТОСЪЕМКИ

1.6.9 – геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Юркевич Наталия Викторовна, к.г.-м.н., зам. директора научно-исследовательского центра по проблемам экологической безопасности и сохранения благоприятной окружающей среды «Экология» СО РАН, (383) 238-34-17, e-mail: yurkevich.nataliya@sb-ras.ru

Официальные оппоненты:

Модин Игорь Николаевич, д.т.н., профессор кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, (495) 939-49-63, e-mail: imodin@yandex.ru

Буддо Игорь Владимирович, к.г.-м.н., заведующий лабораторией Комплексной геофизики института Земной коры СО РАН, (3952) 42-70-00, e-mail: biv@crust.irk.ru

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 25 марта 2025 г. в 14.00 часов на заседании Диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц- зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, Новосибирск, пр-т Акад. Коптюга, 3, Неведровой Н.Н., ИНГГ СО РАН; Факс: (383) 333-25-13, 330-28-07; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН и на сайте <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/karin2024>

Автореферат разослан 12 февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, д.г.-м.н., доцент



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования - методы малоглубинной геоэлектрики, электротомография (ЭТ) и электромагнитное профилирование (ЭМП), исследуются на предмет разработки методики их применения в совокупности с аэрофотосъемкой (АФС) и результатами геохимического опробования для оценки объемов хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов (ГОК) при решении задач охраны окружающей среды.

Актуальность. Загрязнение почв из-за миграции отходов за пределы хранилищ – экологическая проблема, являющаяся актуальной в России и за рубежом на протяжении последних 50 лет, что отражено в работах [Мур и Рамамурти, 1987; Salomons, 1995; Ackman 2003; Lottermoser, 2007; Nordstrom, 2015] и [González-Morales et.al., 2023]. Применение геохимического опробования без предварительной геофизической съемки увеличивает количество точек отбора проб и трудозатраты при проведении геохимических исследований. Чаще всего для изучения отвалов горно-обогатительных комбинатов используется метод электротомографии [Bortnikova et al., 2011, 2013; Yurkevich et al., 2015, Модин и др. 2020, Бобачев и др., 2021, Куликов и др., 2021; Эпов и др., 2017].

Однако отсутствие оперативно полученной информации о рельефе, распределении удельного электрического сопротивления (УЭС) отходов и границ хвостохранилища (ХХ) затрудняет организацию сети геоэлектрических исследований методом электротомографии. Применение электромагнитного профилирования при исследовании отходов ГОК позволяет оперативно получать информацию о распределении УЭС, но только в плане и в небольшом диапазоне глубин (чаще всего первые метры). Развитие малогабаритных беспилотных летательных аппаратов и программного обеспечения для фотограмметрической обработки ортофотоснимков дает возможность в короткие сроки построить ортофотоплан и цифровую модель рельефа на площади более 10000 квадратных метров. При этом точности построения цифровой модели рельефа достаточно, чтобы эту информацию было возможно применять для построения геоэлектрических моделей с учетом рельефа по данным электротомографии.

Из-за недостатка научно-обоснованных методик становится невозможно полноценно сравнивать между собой различные по типу хвостохранилища, делать выводы о наличии путей миграции потенциально токсичных веществ и связи состава отходов с их УЭС.

Разработка методики совместного применения вышеперечисленных методов позволит использовать преимущества

каждого из них для создания современного и эффективного инструмента оценки объемов вещества хвостохранилищ ГОК.

Цель исследования – развитие методического обеспечения для решения задач охраны окружающей среды, которые включают оценку объемов полезных и потенциально токсичных веществ хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов, за счет комплексного применения электротомографии и электромагнитного профилирования, совместно с результатами геохимического опробования и аэрофотосъемкой.

Научно-техническая задача – разработать методику совместного применения и обработки результатов измерения комплекса методов (электромагнитного профилирования, электротомографии, геохимического опробования и аэрофотосъемки) при построении геоэлектрических и структурных моделей хвостохранилищ для оценки объема вещества отходов.

Защищаемый результат

Методика совместного применения и обработки результатов электромагнитного профилирования, электротомографии, геохимического опробования и аэрофотосъемки при построении структурных моделей хвостохранилищ для оценки объема вещества отходов.

Этапы исследования хвостохранилища с применением разработанной методики включают:

1. Построение ортофотоплана, определение видимых границ, оценка реальных размеров объекта.
2. Построение карты высот, оценка объема относительно нижней точки рельефа в пределах видимых границ хвостохранилища.
3. Геофизические наблюдения с применением электромагнитного профилирования (ЭМП) и электротомографии (ЭТ).
4. Построение геоэлектрических моделей по данным ЭМП и ЭТ.
5. Корреляционный анализ данных площадного геохимического опробования и шурфовки с данными ЭМП и ЭТ.
6. Интерпретация геоэлектрических разрезов, построение структурных моделей.
7. Расчет объема отходов по структурным моделям.

Личный вклад

Диссертационная работа базируется на данных, полученных непосредственно Ю.Г. Карным методами электротомографии и электромагнитного профилирования. Автором выполнены измерения на территории четырех хвостохранилищ Кемеровской области, осуществлена обработка и интерпретация полевых данных, построены

геоэлектрические и структурные модели исследуемых объектов. Соискатель лично проводил аэрофотосъемку с помощью квадрокоптера Dji Mavic Air на территории Белоключевского отвала и хвостохранилища Талмовские пески и обрабатывал данные. С использованием данных электроразведки, геохимического опробования, аэрофотосъемки автором разработана экспресс методика построения структурных моделей, на основе которых рассчитан объем отходов на исследуемых участках, а также количество потенциально токсичных и полезных элементов.

Научная новизна

Впервые на хвостохранилищах Кемеровской области применен комплекс методов аэрофотосъемки, электромагнитного профилирования и электротомографии для построения геоэлектрических и структурных моделей исследуемых объектов.

Разработана методика совместного применения и обработки результатов методов электромагнитного профилирования, электротомографии, геохимического опробования и аэрофотосъемки при построении структурных моделей хвостохранилищ для оценки объема отходов. Новизна разработанной методики заключается в:

- использовании данных аэрофотосъемки для построения верхней границы хвостохранилищ;

- применении карты кажущегося УЭС по данным электромагнитного профилирования для оптимизации геохимического опробования по площади и построения сети профилей для метода электротомографии, определения границ хвостохранилищ в плане;

- построении стартовой модели по результатам геохимического опробования в шурфах для одномерной инверсии данных электротомографии с помощью программы Ip2Win с фиксированными параметрами (УЭС и/или мощность слоя);

- использовании полученных в результате одномерной инверсии границ геоэлектрических слоев для двумерной автоматической инверсии данных электротомографии в заданных пределах с помощью программы Res2dInv.

Впервые для Белоключевского отвала с применением методов электротомографии и электромагнитного профилирования оценены количество и объем полезных и потенциально токсичных элементов: железа, меди, цинка, золота, мышьяка и ртути.

Фактический материал, методы и программные средства.

В исследовании применяются широко известные, зарекомендовавшие себя современные методы исследования верхней части разреза – электромагнитное профилирование, электротомография, геохимическое опробование, ортофотосъемка с применением компактных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Аппаратура, реализующая применяемые методы, выпускается серийно, калибрована или имеет сертификаты соответствия, апробирована результатами полевых измерений, опубликованными в рецензируемых журналах.

Численное моделирование и инверсия данных электротомографии выполняется с использованием широко известных программ Res2dInv (Малайзия) и IPI2 Win (Россия). Программы тестировались на представительном расчетном и практическом материале. Геоэлектрические модели, полученные в результате исследования, верифицировались прямыми измерениями УЭС вещества отходов в шурфах.

Выводы базируются на результатах полевых исследований для четырех хвостохранилищ разного типа формирования: Дюков Лог, Комсомольский гидроотвал, Талмовские пески и Белоключевской отвал.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Разработанная методика позволяет оценить объем хвостохранилищ. Суть методики – последовательное применение методов аэрофотосъемки, электромагнитного профилирования, электротомографии и геохимического опробования шурфов. В результате применения описанного выше комплексного подхода определяются границы исследуемого объекта, строятся структурные модели хвостохранилища и оценивается объем отходов.

Предложен подход к обработке данных электротомографии, который заключается в построении стартовой модели на основе данных геохимического опробования шурфов. Затем проводится одномерная инверсия данных электротомографии с фиксированными параметрами, с целью определения границ выделяемых слоев, с учетом стартовой модели. Полученные границы используются для проведения двумерной инверсии данных электротомографии в заданных пределах в программе Res2dInv. Такой подход позволяет повысить приближенность получаемых двумерных моделей к истинному строению исследуемого объекта. Построены геоэлектрические и структурные модели некоторых участков хвостохранилищ.

Получены новые знания о структуре изучаемых объектов, определены верхние и нижние границы хранилищ отвалов: для

Белоключевского и Талмовских песков посчитаны общие объемы отходов, выявлены пути миграции минерализованных растворов за пределы объектов на Белоключевском отвале в грунтовые воды под телом насыпи и на Дюковом логу через дамбу вниз по склону, а также определены усредненные количества различных элементов в изучаемых хвостохранилищах. Так, для Белоключевского отвала общее количество железа составляет более 11 тысяч тонн, меди и цинка – более 15 тонн, золота – 112 кг, при этом содержание потенциально токсичных веществ, таких как мышьяк и ртуть – 63 и 15 тонн соответственно.

Достоверность

Достоверность разработки обеспечена всесторонним анализом выполненных ранее научных исследований, верификацией данных электротомографии (26 геоэлектрических разрезов) результатами геохимического опробования в шурфах и численным моделированием, верификаций данных частотного электромагнитного профилирования (общая площадь исследования 15000 м²) результатами геохимического опробования по площади для хвостохранилищ различного типа формирования, апробацией полученных результатов на российских и международных конференциях.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных российских и международных конференциях в Екатеринбурге (2024), Новосибирске (2014, 2017, 2020, 2021), Баку (2019), Томске (2012, 2017).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в трех статьях в журналах, рекомендованных Перечнем ВАК («Геология и геофизика», «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири») **(все статьи в журналах категории K1).**

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения общим объемом 102 страницы, содержит 46 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы включает 106 наименований.

Благодарности

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Юркевич Н.В.

Автор искренне признателен академику РАН, д.т.н. М.И. Эпову и член-корреспонденту РАН, д.ф.-м.н. Глинских В.Н.

Автор благодарит сотрудников ИНГГ СО РАН, экспертов и коллег, принимавшим участие в полевых работах: д.г.-м.н. Бортникову

С.Б., д.т.н. Балкова Е.В., д.т.н. профессора Ельцова И.Н., д.г.-м.н. Кожевникова Н.О., д.т.н. Грузнова В.М., д.г.-м.н. Неведрову Н.Н., к.г.-м.н. Оленченко В.В., к.т.н. Потапова В.В., Самойлову В.И., к.г.-м.н. Саеву О.П., к.г.-м.н. Корнееву Т.В., к.г.-м.н. Абросимову Н.А., к.г.-м.н. Еделева А.В.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам Института геофизики имени Ю.П. Булашевича и директору института к.г.-м.н. Козловой И.А., а также член-корреспонденту РАН, д.ф.-м.н. Мартышко П.С. за ценные замечания, рекомендации и уделенное внимание.

Автор благодарит оппонентов: д.т.н., профессора Модина И.Н. и к.г.-м.н., доцента Буддо И.В. за уделенное время, ценные замечания и отзывы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и научная задача исследования, перечислены защищаемые научные результаты, показана их новизна, определена научная и практическая значимость.

Первая глава является обзорной частью работы, в которой рассмотрены различные подходы к изучению хвостохранилищ, проанализированы результаты применения различных методов (электроразведочных и георадиолокации) при исследовании техногенных объектов и сделаны выводы о возможностях развития применяемых подходов для решения экологических задач.

Начиная с 1969 года, количество публикаций по проблемам изучения хвостохранилищ растет. Однако результаты применения электроразведочных методов, таких как вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), метод вызванной поляризации (ВП), переходных процессов, наиболее активно публикуются с середины 90-х годов прошлого века [Barker, 1990; Oldenburg, 1999; Campbell et.al., 1999; Benson, 1997; Beard et.al., 1995; Buselli, 2001; Рыбальченко и др., 2019]. В основном, вышеперечисленные методы используются для выделения путей миграции и дренажа подземных вод, в том числе и в хвостохранилищах.

Поскольку «хвосты» как правило имеют электросопротивление значительно меньше электросопротивления окружающих коренных пород, естественно предположить, что методы электроразведки будут эффективны при оконтуривании области распространения и обнаружения путей миграции веществ за пределы хранилищ [Бобачев и др., 2006; Nearing et al, 2013].

Применение электроразведки в комплексе с георадарометрией и геохимическим анализом позволяют не только обнаружить пути миграции высокоминерализованных растворов, но и сделать выводы о связи электросопротивления с такими характеристиками среды, как размер частиц и минерализация [Poisson et al, 2009; Gomez-Ortiz, 2010; Grangeia et al., 2011].

Начиная с 2009 года, растет количество публикаций, связанных с поиском водоносных горизонтов, а также для определения солёности почв и путей миграции водных растворов методом электротомографии [Abdul Nassir et al., 2000; Binley et al, 2002; Bauer et al., 2006].

Комплексирование гидрологических наблюдений и электротомографии позволяют выделить пути загрязнения поверхностных и подземных вод от заброшенных рудников [Hudson et al., 2018; Martín-Moreno et al., 2018].

Во многих рассмотренных случаях авторы статей используют результаты двумерной инверсии данных электротомографии, однако полученный в результате геоэлектрический разрез, раскрашенный непрерывной градиентной заливкой, не дает четкого представления о положении границ объектов, выделяемых на разрезах. Границы, проводимые авторами, могут пересекать несколько изолиний на геоэлектрическом разрезе, что приводит к весьма субъективной оценке получаемых результатов [Camarero, Moreira, Pereira, 2019].

Метод электротомографии широко применяется при решении задач картирования путей миграции грунтовых вод и минерализованных растворов, а также для мониторинга гидротехнических сооружений, оценки распространения загрязняющих веществ и при решении других подобных задач [Martínez et al., 2016; Cortada et al., 2017; Martin-Crespo et al., 2018, Шестаков и др, 2023]. Также достаточно популярен и метод частотного профилирования [Poisson et al., 2009; Nearing et al., 2013, Арзамасцев и др, 2015] при исследовании первых метров разреза.

Однако комплексирование методов часто не предполагает четкой, систематизированной последовательности действий, до сих пор не было предложено общей геофизической методики исследования техногенных систем (сульфидсодержащих отходов горнорудного производства). В нашем случае исследуемые объекты имеют схожие геоэлектрические характеристики, контрастные по отношению к вмещающей среде, что способствует получению достоверных результатов. Другой характерной особенностью является небольшая мощность исследуемых отложений (от 2 до 20 м). Это связано с категорично другим подходом при формировании хвостохранилищ. В СССР и России огромные территории позволяли складировать отходы

непосредственно в русла рек или на других открытых участках, зачастую специально не оборудованных. Что привело, в свою очередь, к значительному распространению загрязняющих веществ в окружающую среду.

Из-за недостатка научно-обоснованных методик становится невозможно полноценно сравнивать между собой различные по типу хвостохранилища, делать выводы о наличии путей миграции потенциально токсичных веществ и связи состава отходов с их удельным электрическим сопротивлением (УЭС).

Разработка методики совместного применения вышеперечисленных методов позволит использовать преимущества каждого из них для создания современного и эффективного инструмента оценки объема и количества веществ хвостохранилищ ГОК.

Во второй главе описаны выбранные методы исследования хвостохранилищ и программное обеспечение для обработки данных этих методов.

Акцентируется внимание на особенностях каждого из них, способствующих получению достоверной информации об изучаемой среде. Так для аппаратуры электромагнитного профилирования (ЭМП) [Манштейн и др., 2008] особенностью является трансформация регистрируемого сигнала в кажущиеся УЭС, которая производится в режиме реального времени, что позволяет оперативно получить необходимую информацию об объекте и спланировать дальнейшие работы по геохимическому опробованию или съемке методом электротомографии. Аппаратура хорошо зарекомендовала себя для решения задач экологии [Манштейн и др., 2014; Шапаренко и др., 2014; Манштейн и др., 2015; Манштейн и др., 2016].

Аппаратурные комплексы Скала, реализующие метод электротомографии (ЭТ), хорошо зарекомендовали себя при решении инженерных, гидрогеологических и экологических задач [Манштейн и др., 2014; Шапаренко и др., 2014; Манштейн и др., 2015; Манштейн и др., 2016]. Применение современных аппаратурных комплексов для электротомографии позволяют на порядок увеличить производительность и разрешающую способность контактной электроразведки в сравнении с классическим методом ВЭЗ. Для детального расчленения верхней части разреза (первые метры) использовались расстояния между электродами 30 см, в то же время для достижения большой глубинности (40 и более метров) шаг выбирался 5 метров и более. В зависимости от модификации применяемой электроразведочной станции одна расстановка может содержать 48, 64 или более электродов.

Комплексирование электромагнитного профилирования и электротомографии может быть успешным при исследовании верхней части разреза до глубины первых метров [Балков, Карин и др., 2019, 2021, 2023; Карин и др., 2022]. Немаловажным результатом такого объединения методов служит определение целевой глубины исследования ЭМП по результатам площадных исследований ЭТ [Балков, Карин и др., 2021].

Аэрофотосъемка с применением компактных БПЛА часто применяется для получения информации о рельефе земной поверхности и степени его изменения со временем [Быков и др., 2013; Быков и др., 2015; Parcero-Oubiña et al., 2016; Шеремецкая, 2018]. При изучении хвостохранилищ важно учитывать особенности рельефа при обработке и интерпретации данных электротомографии. Рельеф дневной поверхности может быть использован при оценке объемов отходов в качестве верхней границы хранилища. Несмотря на ограничение по времени полета (10 минут), использование дрона DJi Mavic Air позволило обследовать площади до четверти квадратного километра с высоты до 50 метров. При перекрытии снимков в 80 % достигается минимально необходимое количество данных для построения цифровой модели рельефа.

При работах с помощью DJI Mavic Air для планирования полетов используется программа Drone Harmony Plus (<https://droneharmony.com>), для обработки данных фотограмметрии применяется ПО Metashape (Agisoft, Россия, <https://www.agisoft.com/>). Обработка, оформление и визуализация цифровых моделей рельефа и карт относительных высот проводится в программе Surfer (Golden Software, США, <https://www.goldensoftware.com>).

Для работы с аппаратурой ЭМС в полевых условиях применялось приложение для мобильных ОС Windows EMS Control [Балков и др., 2015.] Для предварительной обработки данных аппаратуры ЭМС используется программное обеспечение Isystem, предоставляемое производителем аппаратуры. Оно позволяет произвести первичную фильтрацию, выбор массива данных, подготовить данные к визуализации в программе Surfer. Экспорт данных может производиться не только в УЭС, но также в единицах АЦП или мВ регистрируемого сигнала.

Инверсия данных электротомографии проводится в программе Res2dinv (Малайзия). Программа используется для расчета значений кажущегося сопротивления и с помощью метода нелинейной оптимизации, на основе наименьших квадратов, проводится инверсия [deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Loke and Barker 1996a]. Одной из особенностей данной программы является непрерывная гладкая параметрическая модель, получаемая после инверсии полевых данных,

при этом чаще всего при интерпретации полученных моделей границы проводят по изолиниям определенных сопротивлений. Программа также содержит инструментарий для учета априорной информации, можно задавать границы, известные по имеющимся данным, или добавлять области с известными сопротивлениями.

В третьей главе представлены результаты проведенных исследований на четырех хвостохранилищах различного типа формирования.

По результатам дешифрации ортофотоплана по данным аэрофотосъемки (АФС) **Белоключевского отвала (БО)** была выделена визуально определяемая граница хранилища, которая в дальнейшем была уточнена в южной части с помощью ЭМП. С учетом полученной по тем же данным АФС цифровой модели рельефа удалось оценить общий объем отходов относительно нижней точки на теле отвала (рис. 1), который составил 103 м^3 .

Построены структурные модели на основе двумерных геоэлектрических разрезов. Оценена максимальная мощность отвала и площадь предполагаемого канала миграции вещества отходов за пределы хранилища (рис. 2).

Оценен объем отходов по результатам трехмерной инверсии данных ЭТ на участке хвостохранилища. Оценены количества золота, серебра и мышьяка для всего отвала и для объема среды с УЭС менее 20 Ом·м на участке хвостохранилища, по которому строилась трехмерная геоэлектрическая модель (рис. 3).

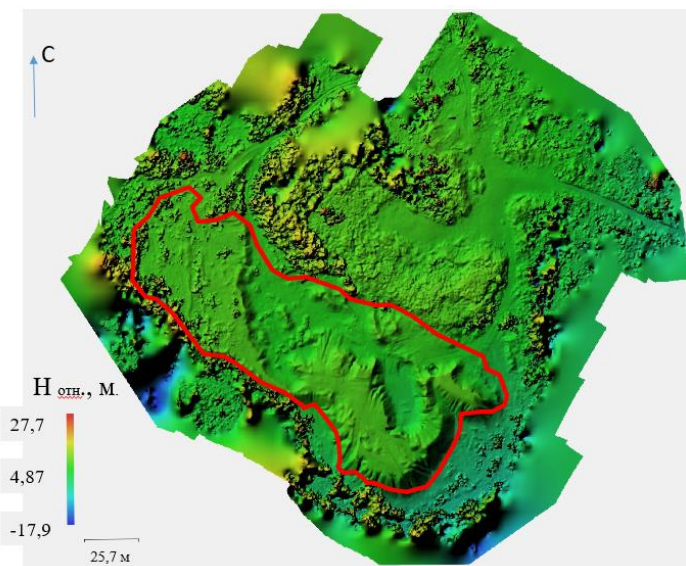


Рисунок 1 – Цифровая модель рельефа Белоключевского отвала. Красной линией показана видимая граница хранилища по данным АФС.

Геоэлектрические разрезы по данным ЭТ были проинтерпретированы с учетом геохимического опробования в шурфе и по площади отвала (рис. 2).

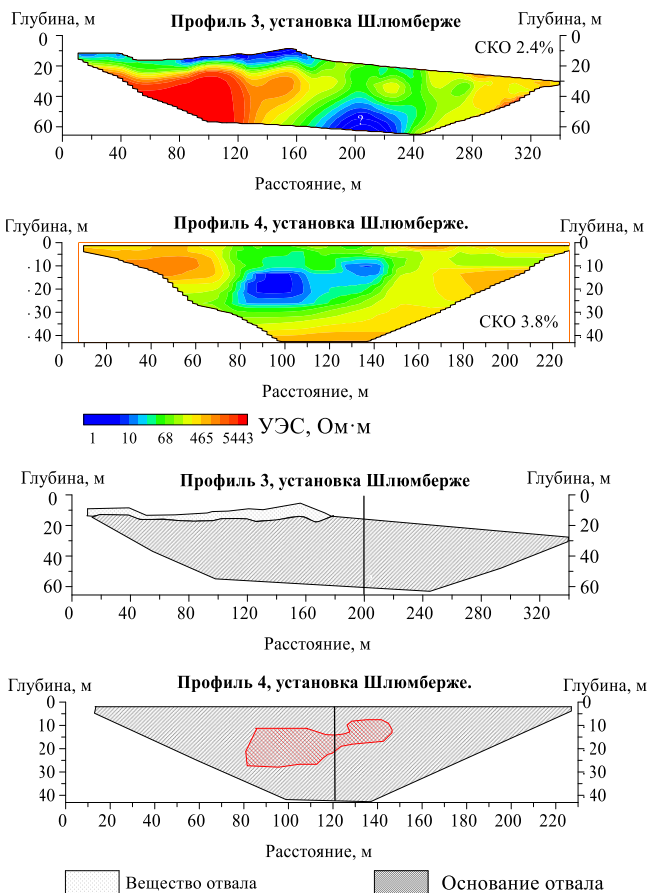


Рисунок 2 – Структурные модели и геоэлектрические разрезы по профилям 3 и 4.

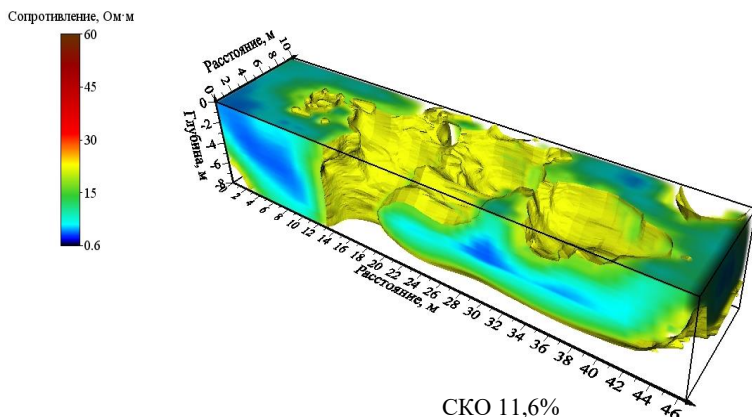


Рисунок 3 – Трехмерная геоэлектрическая модель участка Белоключевского отвала.

Наличие существенных корреляций между рН и УЭС, между электропроводностью по данным кондуктометрии паст из вещества отходов и УЭС по данным ЭМП, свидетельствуют о корректности применения методов электроразведки для изучения техногенных объектов [Юркевич, Карин и др., 2017].

Применяемые подходы к изучению БО положены в основу разрабатываемой методики для изучения техногенных объектов.

Хвостохранилище Дюков лог смешанного типа образовалось в результате складирования отходов флотации и цианирования рудных тел еще в 1942-1975 годах. Проводились исследования методом ЭТ по трем профилям (рис. 4).

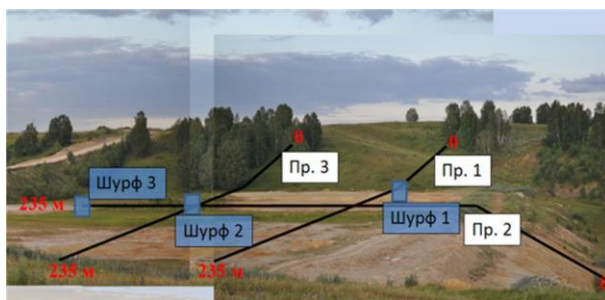


Рисунок 4 – Схема наблюдения на хвостохранилище Дюков лог

Профиль 2 позволил выделить пути миграции вещества отвалов через заградительную дамбу. Максимальная мощность отходов превышает 25 м (рис. 5).

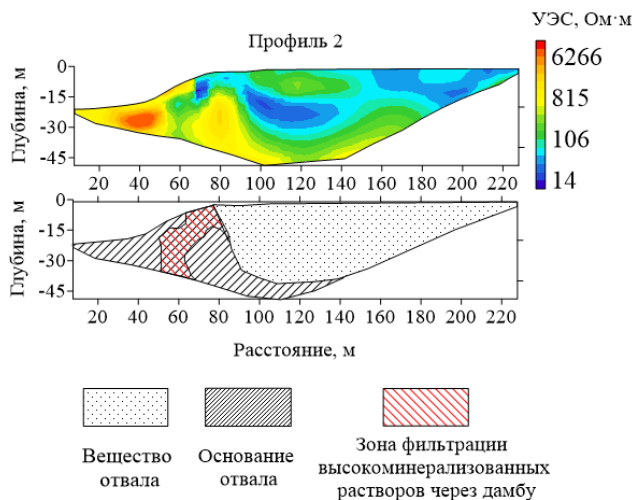


Рисунок 5 – Геоэлектрический разрез и структурная модель по профилю электротомографии №2. СКО не более 5%. Локализована зона фильтрации высокоминерализованных растворов через дамбу.

На **Комсомольском гидроотвале** в результате проведенных исследований методом ЭМП было выяснено, что вещество отвала имеет незначительные изменения кажущихся величин УЭС в первых дециметрах отходов, по результатам ЭМП. При этом данные ЭТ, полученные при измерении вдоль профилей на двух участках гидроотвала, имеют выраженные приповерхностные аномалии (до 1 метра глубиной и интенсивностью 14-50 Ом·м). Вещество отходов по данным контактной электроразведки имеет диапазон УЭС от первых единиц до 14 Ом·м. Общая мощность отходов не превышает 2 м, утечек за пределы оградительных сооружений по профилям 4 и 6 выявлено не было.

Геоэлектрические модели по профилям 1 и 2 на северной площадке гидроотвала, как выяснилось после опробования трех шурфов, имеют слабую корреляцию с результатами прямой резистивиметрии (рис. 6).

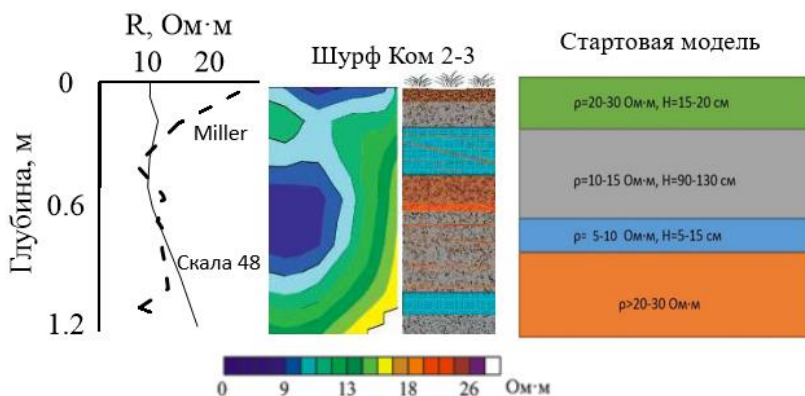


Рисунок 6 – Графики УЭС по результатам ЭТ и резистивиметрии в шурфе Ком 2-3 (слева), фрагмент геоэлектрического разреза по данным ЭТ и схематичное изображение шурфа (в центре), стартовая модель (справа).

Для коррекции геоэлектрических моделей был предложен подход к обработке данных ЭТ. В первую очередь на основе опробования шурфов и прямых кондуктометрических или резистивиметрических измерений строится стартовая модель исследуемого участка отвала. Можно выделить три основных типа грунтов: дёрн, пиритные пески и глины. Сопротивление для глин по данным резистивиметра Miller 400D варьирует в диапазоне от 6 до 10 Ом·м, для песков характерны значения 8-16 Ом·м, дерн имеет максимальный разброс 4 - 26 Ом·м, однако основная часть данных попадает в диапазон 11-26 Ом·м. Мощности слоев определены по данным шурфовки [Yurkevich, **Karin** et al., 2017].

Последующая инверсия данных электротомографии проходит в два основных этапа:

- 1) Построение одномерных моделей с учетом ранее выбранной стартовой модели для получения предварительных границ слоев.
- 2) Двумерная инверсия данных ЭТ с ограничениями, в роли которых выступают предварительные границы слоев по результатам 1D инверсии.

Таким образом, учет априорной информации в программе двумерной инверсии позволяет получить двумерную геоэлектрическую модель, приближенную к реальности.

На рис. 7 показан результат одномерной инверсии по профилю 2 на первой площадке. При построении одномерных моделей

фиксировалось сопротивление слоя глин (5 Ом·м). Остальные параметры определялись в автоматическом режиме. В результате был построен геоэлектрический разрез; черными линиями показаны границы, полученные в результате одномерной инверсии (рис. 7). Полученные модели согласуются с заданной стартовой моделью и априорной информацией по шурфам. В частности диапазон сопротивлений для подстилающих материнских пород – 25-30 Ом·м, для песков – 12-20 Ом·м, а для глин – до 10 Ом·м. Мощности слоев близки к мощностям по данным шурфовки.

Верхний слой дерна не выделился на геоэлектрических моделях, хотя опробование шурфами показало, что электросопротивление верхнего дернового слоя может быть выше сопротивления пиритных песков. Вероятно, это обусловлено расстоянием между электродами в измерительной установке, большим, чем мощность первого слоя.

На примере хвостохранилища **Талмовские пески** показаны результаты исследования техногенного объекта руслового типа. Работы, выполненные в 2012 году, показали перспективность применения методов ЭМП и ЭТ для построения моделей такого типа хранилища. В 2019 году были проведены площадные исследования серий параллельных профилей ЭТ и аэрофотосъемка (АФС). По результатам АФС построен ортофотоплан и цифровая модель рельефа. Выделены пути миграции поверхностных стоков за пределы ХХ, оценен объем вещества отходов относительно нижней точки поверхности ХХ по данным цифровой модели рельефа (ЦМР).

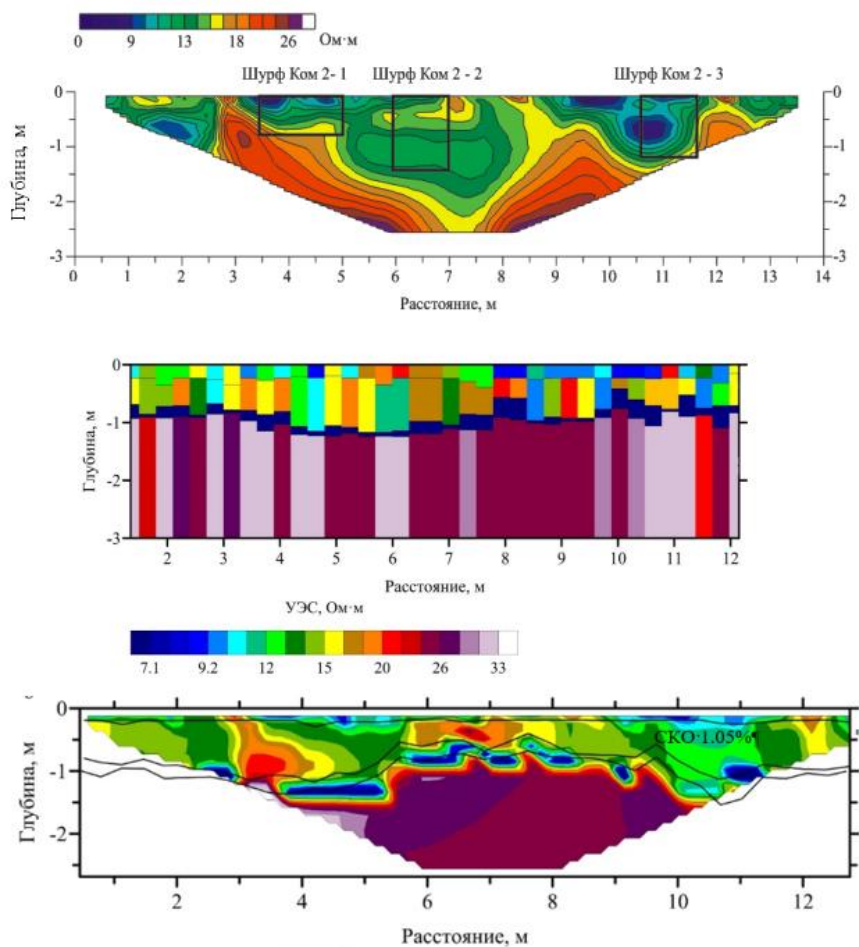


Рисунок 7 – Геоэлектрический разрез по данным ЭТ без корректировки (сверху), результат одномерной инверсии данных ЭТ по профилю 2 (в центре), геоэлектрический разрез по профилю 2 после корректировки (снизу).

В результате трехмерной инверсии данных ЭТ была построена геоэлектрическая модель (рис. 8.), оценены объемы вещества отходов и количества полезных и потенциально токсичных веществ для различных диапазонов УЭС (Таблица 1) [Юркевич, ..., **Карин** и др., 2023].

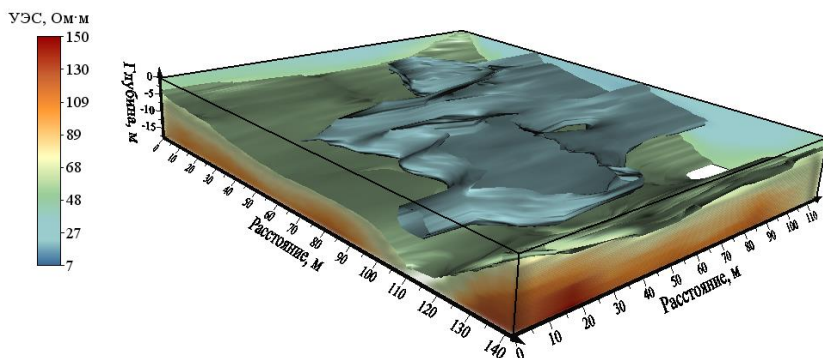


Рисунок 8 – Исоповерхности, построенные результатам трехмерной инверсии данных ЭТ. Исоповерхность по УЭС 15 Ом·м ограничивает объем в 16 тыс. м³, изоповерхность по УЭС 50 Ом·м ограничивает объем 100 тыс. м³ относительно дневной поверхности. СКО решения обратной задачи - 2.6%.

Таблица 1. Объемы среды для веществ с различным УЭС (сверху), масса некоторых веществ, содержащихся в исследуемых отходах (снизу).

Диапазон сопротивлений, Ом·м	0-15	15-20	0-20	20-50	0-50
Объем среды, м ³	16015	31693	47708	53279	100987

	Fe	Al	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Co	Ni	As	Sb	Be
Масса, кг	69 т	11 т	1.7 т	3.9 т	82 т	570	350	21	35	120	18	11	0.5

Шаги защищаемой методики исследования техногенных объектов

На основании результатов исследования четырёх различных по способу формирования хранилищ отходов были зафиксированы итоговые шаги защищаемой методики исследования техногенных объектов.

Для корректного построения структурных моделей хранилищ и оценки объема отходов необходимо учитывать видимый рельеф местности, а также распределение вещества в теле отвала. Для этого необходимо:

1) В первую очередь, для оценки размеров объекта в плане и особенностей поверхностного строения хвостохранилища проводится аэрофотосъемка, строится цифровая модель рельефа и ортофотоплан. ЦМР позволяет оценить объем хвостохранилища относительно самой нижней точки в пределах видимых границ хранилища отходов. Видимые границы определяются по ортофотоплану.

2) Следующим этапом производится съемка методом частотного электромагнитного профилирования для определения геоэлектрических границ объекта в плане, а также выделения аномальных по УЭС зон для постановки шурфов. В некоторых случаях, например, где присутствует поверхностный снос и миграция отходов за пределы хвостохранилища, видимые границы, определяемые по ортофотоплану, могут отличаться от границ техногенного объекта, определяемых по УЭС. На основании карты распределения кажущихся УЭС планируется расположение профилей ЭТ и точек геохимического опробования.

3) Проводится съемка методом электротомографии, определяются нижние границы хранилища и строятся двумерные и трехмерные геоэлектрические модели. На основании этих моделей вещество хранилища разбивается на отдельные слои и участки. Критерии для разбиения определяются по результатам геохимического опробования.

4) Геохимическое опробование основывается на постановке шурфов и съемке методом электротомографии с малым шагом и проводится для выявления взаимосвязей между удельным электрическим сопротивлением среды и физико-химическими параметрами вещества отходов (значения УЭП и УЭС по данным кондуктометрии и резистивиметрии, значения рН по результатам потенциометрии). На основании проведенных исследований определяются критерии разбиения вещества отходов по слоям с различными диапазонами УЭС. Строится одномерная модель хвостохранилища.

5) Если геоэлектрические разрезы, полученные в ходе автоматической двумерной или трехмерной инверсии данных электротомографии, слабо коррелируют с результатами исследования шурфов, используется метод обработки данных ЭТ, учитывающий стартовую модель, созданную на этапе 4.

6) Полученные геоэлектрические модели по данным ЭТ интерпретируются с учетом корреляционных связей, определенных на этапе 4, строятся структурные модели хвостохранилища.

7) По структурным моделям в программе Surfer строятся верхние и нижние границы интересующих слоев, определяется объем

среды, ограниченный двумя поверхностями, на основе выделенных границ. Расчет объема веществ сводится к построению в программе Surfer двух поверхностей, которые ограничивают интересующий участок сверху и снизу. Для нижних границ могут быть использованы данные электротомографии, поверхности следует строить по точкам с одинаковым сопротивлением. Верхние границы могут быть получены путем оцифровки рельефа дневной поверхности по данным аэрофотосъемки. Затем с помощью инструмента Volume в программе Surfer рассчитывается объем вещества между двумя поверхностями.

Переход к объему и массе конкретного вещества или химического элемента (например, золота или мышьяка) возможен, когда известно его усредненное количество на один кубический метр вещества отвала по результатам исследования образцов отходов в лаборатории [Карин и др., 2020].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика построения геоэлектрических и структурных моделей хвостохранилищ для оценки объема отходов, которая заключается в систематизированной последовательности действий: «аэрофотосъемка, наземные исследования методами ЭМП и электротомографии, геохимическое опробование по площади и в шурфах, корреляционный анализ полученных данных, построение геоэлектрических и структурных моделей, расчет объема отходов» [Карин и др., 2017].

Разработанная методика позволяет сократить количество геохимических опробований за счет выделения контрастных по УЭС участков, выявить геоэлектрические границы хвостохранилища, а также обнаружить пути миграции веществ за пределы исследуемого объекта. Полученные с помощью разработанной методики границы хранилища используются для расчета усредненного количества ценных, токсичных компонентов и общего объема вещества отходов. Таким образом восполнен недостаток существующих подходов к изучению техногенных объектов хранения отходов горно-обогатительных комбинатов, заключавшийся в отсутствии систематизированной последовательности действий для получения необходимого минимума информации, по которой в дальнейшем возможно построить структурную модель исследуемого объекта.

Оценено усредненное количество потенциально полезных и токсичных элементов в хранилище отходов разработки полиметаллического месторождения (Белоключевское, Кемеровская область) с применением разработанной методики. Общее количество

меди и цинка – более 15 тонн, золота – 112 кг, содержание потенциально токсичных веществ, таких как мышьяк и ртуть – 63 и 15 тонн соответственно.

Разработан новый подход к обработке и интерпретации данных электротомографии, суть его подробно изложена в главе 3 настоящей работы и опубликована в [Карин и др. 2017]. С применением разработанного подхода к обработке и интерпретации данных электротомографии были определены границы и построены структурные модели хранилищ отходов: Белоключевское, Дюков Лог, Талмовские пески и Комсомольское.

Таким образом, решена задача разработки методики построения геоэлектрических и структурных моделей хвостохранилищ для оценки объемов потенциально токсичных и полезных элементов. В том числе адаптированы существующие методики обработки и интерпретации результатов измерения методом электротомографии при решении задач по исследованию вещества отходов, складированных в хвостохранилищах, и определения областей распространения подземных дренажных потоков.

Дальнейшее развитие методики следует направить на выявление количественных взаимосвязей между УЭС вещества отходов и их количественным составом, а также на увеличение информативности метода электротомографии за счет применения скважинно-поверхностных измерений и геохимического опробования на всю глубину исследуемых объектов. Что должно повысить достоверность получаемых с помощью методики результатов.

Экономический эффект при проведении исследований на хвостохранилищах будет выражаться в снижении финансовых, временных и трудовых затрат на геохимическое опробование за счет сокращения количества отбираемых проб. Аэрофотосъемка, электротомография, частотное профилирование с геохимическим опробованием позволяют решить сразу две задачи: оценку объемов хвостохранилища, обнаружение путей миграции веществ за пределы объектов исследования. Разработанная методика — это шаг в сторону научного обоснования методологии разведки и геолого-экономической оценки горнопромышленных отходов, с помощью которых хвостохранилища возможно перевести в статус техногенных месторождений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК:

- 1) Юркевич Н.В., Хусаинова А.Ш., Бортникова С.Б., Бондаренко В.П., **Карин Ю.Г.**, Коханова С.П. Ресурсы барита, цветных и благородных металлов в хвостохранилище Талмовские пески: минералого-геохимические и геофизические данные // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 3(55). – С. 105-114.
- 2) Бортникова С. Б., Юркевич Н. В., Еделев А. В., Саева О. П., Грахова С. П., Волынкин С. С., **Карин, Ю.Г.** Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 2. – С. 26-35.
- 3) Эпов М. И., Юркевич Н. В., Бортникова С. Б., **Карин Ю. Г.**, Саева О. П. Определение состава горнорудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – №. 12. – С. 112-115

Материалы и тезисы конференций:

- 1) **Карин Ю. Г.**, Юркевич Н. В. Методика построения моделей для оценки объемов хранилищ отходов горнорудного производства по данным электротомографии, электромагнитного профилирования и аэрофотосъемки // XXV Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов, Екатеринбург, 25–29 марта 2024 года. – Екатеринбург: Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 2024. – С. 67-71. – EDN OUSVPS.
- 2) **Карин Ю. Г.**, Юркевич Н. В. Подход к обработке данных электротомографии для оценки объемов веществ хвостохранилищ // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – №. 2. – С. 62-66
- 3) **Карин Ю. Г.**, Бортникова С. Б., Юркевич Н. В. Методика оценки объемов веществ хвостохранилищ с применением электротомографии, частотного профилирования и аэрофотосъемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология. – 2020. – С. 424-431.
- 4) **Karin Y.**, Yurkevich N., Yeltsov I. Mine wastes: models of mine tailing facilities inferred from geophysical and geochemical investigations // Innovations in minimization of natural and technological risks: Book of

abstracts and Program of the First Eurasian Conference (Baku, Azerbaijan, 22-24 May, 2019). – 2019. – С. 35-35

5) **Карин Ю. Г.** и др. Геоэлектрические модели хвостохранилищ по геофизическим и геохимическим данным // Трофимуковские чтения-2017. – 2017. – С. 249-252.

6) Федорова Т. А., **Карин Ю. Г.** Изучение салагаевского хвостохранилища методом электротомографии // Проблемы геологии и освоения недр. – 2019. – С. 308-310.

7) Юркевич Н. В., **Карин Ю. Г.**, Кулешова Т. А. Состав отвала Белоключевского месторождения золота по данным электромагнитного сканирования и геохимического опробования // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора МИ Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017 г. Т. 1. —Томск, 2017. – 2017. – Т. 1. – С. 853-855.

8) Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., **Карин Ю.Г.**, Саева О.П. Определение состава отходов горнорудного производства при помощи РФА-СИ и геофизических методов исследования // XX Национальная конференция по использованию Синхротронного Излучения "СИ-2014" (г. Новосибирск, 7-10 июля 2014, ИЯФ СО РАН): Тезисы – Новосибирск. – 2014. – С. 93-94

9) Юркевич Н.В., **Карин Ю.Г.**, Саева О.П. Хвостохранилища горнорудного производства: построение связи между данными геофизической съемки и химическим составом (на примере отходов Салаирского горно-обогатительного комбината, г. Салаир) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. – 2012.– С. 283-287.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать XX.XX.2025

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 0,9. Тираж 100. Зак. № 123

ИНГГ СО РАН, ОИТ 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3