

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Юркевич Наталия Викторовна,
кандидат геолого-минералогических наук

Новосибирск

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Объект исследования	4
Актуальность	4
Цель исследования	5
Научно-техническая задача.....	5
Защищаемый результат	6
Личный вклад	6
Научная новизна.....	7
Фактический материал, методы и программные средства	8
Теоретическая и практическая значимость результатов.....	8
Достоверность	9
Публикации по теме диссертации.....	10
Глава 1. Аналитический обзор известных разработок и их особенностей.....	12
Аэрофотосъемка для решения задач экологии	18
Глава 2. Выбранные методы для исследования хвостохранилищ	22
2.1. Метод электромагнитного профилирования.....	22
2.2. Метод электротомографии.....	24
2.3. Пробоотбор, пробоподготовка и химический анализ вещества отходов	26
2.4. Аэрофотосъемка	28
2.5. Программное обеспечение для обработки данных применяемых методов	28
Глава 3. Геоэлектрические и структурные модели хвостохранилищ.....	30
3.1 Хранилище насыпного типа –Белоключевской отвал	30
Структурные модели насыпного хвостохранилища Белоключевской отвал	39
Результаты геохимического опробования.....	41

Выводы	43
3.2 Хранилище руслового типа– Талмовские пески	44
Построение структурных моделей и одномерная инверсия данных ЭМП	51
Выводы	54
3.3 Хвостохранилище– Дюков лог (смешанный тип)	55
Построение структурных моделей	59
Выводы	62
3.4 Комсомольский гидроотвал	63
Подход к обработке данных электротомографии на примере результатов исследования хвостохранилища Комсомольский гидроотвал	74
3.5 Описание методики построения структурных моделей для оценки объемов отходов ГОК на основе результатов исследования хвостохранилищ разных типов.....	79
3.6 Апробация методики построения моделей для оценки объемов отходов ГОК на хвостохранилище Белоключевской отвал	82
Заключение	87
Список литературы	89

Введение

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 и воздуха из-за миграции хвостов за пределы хранилища—экологическая проблема, являющаяся актуальной в России и за рубежом на протяжении последних 50 лет, что отражено в работах [Мур и Рамамурти, 1987; Salomons, 1995; Kontopoulos, 1998; Айриянц, 1999], а также в более современных [Ackman T. E. 2003; Lottermoser, 2007; Nordstrom, 2015; González-Morales M. 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, за рубежом опыт его применения описан в «[Burton & Ball, 2010; Nearing et al., 2013], а в России это работы [Bortnikova et al., 2011, 2013; Yurkevich et al., 2015; Эпов и др., 2017; Бобачев и др., 2021, Куликов и др., 2021, Модин и др. 2024]».

Однако, отсутствие оперативно полученной информации о рельефе, распределении удельного электрического сопротивления (УЭС) отходов и границ хвостохранилища 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 это первые метры). Развитие малогабаритных беспилотных летательных

аппаратов и программного обеспечения для фотограмметрической обработки ортофотоснимков дает возможность за пару часов 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. Однако информацию о рельефе чаще всего используют для оценки эрозии почв и степени деградации растительного покрова земной поверхности.

Из-за недостатка научно-обоснованных методик становится невозможно полноценно сравнивать между собой различные по типу хвостохранилища, делать выводы о наличии путей миграции опасных 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 объема и количества веществ 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. Кариним 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 по теме диссертации

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 К1).**

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.

Глава 1. Аналитический обзор известных разработок и их особенностей

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; Bensen, 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.

Во время проведения полевых исследований техногенных объектов удалось установить, что «отходы как правило имеют УЭС значительно меньше УЭС вмещающих пород» [Карин и др., 2017]. Так, в работе [Nearing et al, 2013] авторы оценивают перспективность применения аппаратуры частотного профилирования с двумя катушками, горизонтальной и вертикальной. Глубинность исследования в 0.5 и 1.5 метра достигается за счет различной ориентации приемных катушек. Авторы сделали ряд выводов о влиянии размера частиц и состава пород на регистрируемые прибором показания.

В рассмотренных далее работах для детального изучения строения хранилищ отходов используется электротомография. Большая плотность точек наблюдений и высокая скорость работы в совокупности с известными возможностями метода ВЭЗ, позволяют сделать выводы о строении исследуемого объекта не только в плане, но и по вертикали, что дает возможность прогнозировать состав на большую, чем доступно, например, шурфовкой, глубину [Шестаков и др, 2023; Давыдов и др., 2023; Федорова и др., 2023]. В работе [Бобачев и др., 2006] описаны исследования одного из хвостохранилищ ГОКа методом ВЭЗ. Используя информацию по скважинам, авторы исследовали строение дамбы по двум профилям до глубины 60 метров. Были сделаны выводы о связи сопротивления с гранулометрическим составом хвостовых фракций и местом расположения источника сброса пульпы. Стоит также отметить, что работы проводились и на

акватории хвостохранилища (гидроотвала), что несколько усложняет получение данных и интерпретацию результатов.

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. В работе [Grangeia et al., 2011] комплекс геофизических методов (георадар и электротомография) совместно с геохимическими методами и данными по скважинам позволил изучить как верхнюю часть разреза с помощью георадара, так и более глубокие отложения вплоть до коренных пород, а геохимический анализ дал больше информации о путях миграции и процессах, происходящих внутри отвалов.

Подобные работы проводились в 2002-2003 годах [Poisson et al, 2009]. Для изучения хвостов применялся комплекс методов: электротомография, георадарометрия и электромагнитное профилирование. Основной результат связи электросопротивления и свойств пород заключается в уменьшении удельной проводимости при увеличении размера частиц с глубиной.

В работе [Gomez-Ortiz, 2010] описываются геофизические изыскания методом электротомографии на хвостохранилищах юго-запада Пиренейского острова. Приводятся результаты применения электротомографии для оценки общей геометрии подошвы хвостов и максимальной мощности отвалов. Во всех случаях наблюдался высокий контраст электросопротивлений отходов и вмещающей среды, именно поэтому применение ЭТ оказалось эффективным. Низкие значения УЭС объясняются высоким содержанием пирита в хвостах и появлением кислотных растворов. Также на одном из объектов удалось определить пути миграции дренажа через тело поврежденной дамбы. Однако следов протекания через основание пруда не обнаружено.

Начиная с 2009 года, растет количество публикаций, связанных с поиском водоносных горизонтов электроразведочными методами [Рыбальченко и др.,

2019; Валеев и др., 2020], а также для определения солености почв и путей миграции водных растворов, в том числе и методом электротомографии. В работах [Abdul Nassir et al., 2000; Binley et al, 2002; Bauer et al., 2006] электротомографию используют для построения карт и разрезов, в том числе для проведения межскважинной томографии и оценки динамических процессов с использованием специальных петрофизических соотношений. Высокая разрешающая способность позволяет, в том числе, выделять границы соленой и пресной воды в исследуемых средах.

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 выделяемых на разрезах объектов. Программное обеспечение Res2dinv [Loke, 2009] имеет в своем арсенале инструмент для учета заранее известных, по априорным данным, границ. Однако им мало кто пользуется, и границы, проводимые авторами, могут пересекать несколько изолиний на геоэлектрическом разрезе, что приводит к субъективной оценке получаемых результатов.

В работе [Camarero, Moreira, Pereira, 2019] авторы представляют результаты исследования дамб на предмет протечек и обводненностей. В результате работы были выделены зоны фильтрации, однако результаты двумерной и трехмерной электротомографии интерпретируются проведением границ, пересекая несколько изолиний. В работе [Jessop et al., 2018] авторы используют чувствительные магнитные датчики для определения путей распространения электрического тока между двумя электродами. Подобная технология, по утверждениям авторов, может определять трехмерное строение зоны фильтрации минерализованных потоков.

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

В работе [Valia et al., 2018] авторы применили большой комплекс методов, включающий в себя гравirazведку, сейсморазведку и электротомографию, которые позволили изучить отходы, определить их структуру, плотность, выявить наличие трещин на дне хранилища. Таким образом авторам удалось расширить объем известной информации о подобного рода объектах.

В исследовании [Martin-Crespo et al., 2018] авторы представили результаты изучения пруда-отстойника шахты Брунита в горнодобывающем районе Испании. Сильный контраст по УЭС между отходами и коренными породами позволил определить нижнюю границу пруда. Границы были подтверждены бурением. Также авторами были рассчитаны объем вещества отходов и массы потенциально токсичных элементов. Стоит отметить, что все расчетные массы веществ определялись, исходя из средней плотности насыпи и среднего содержания элементов в веществе отходов. Границы на разрезах электротомографии были проведены не по изолиниям, на усмотрение интерпретатора.

В [Benyassine et al., 2017] исследовались хвостохранилища старого свинцового рудника, отходы которого с подземными водами распространяются в окрестностях хранилища. Была определена средняя мощность и пути миграции тяжелых металлов по трещинам в гранитах.

Комплексные исследования хвостохранилищ позволили сделать выводы о строении дамбы с помощью электротомографии и выявить дефекты в слоях гидроизоляции и зоны с повышенной влажностью [Cortada et al., 2017]. Химический анализ показал изменения качества поверхностных вод даже после реставрационных работ на хвостохранилище.

Комплекс геохимических и геофизических методов был использован для изучения заброшенного хвостохранилища в Испании [Martínez et al., 2016]. С помощью электротомографии была определена мощность отходов и выделено место для постановки скважины. Геохимическое опробование керна позволило выделить в 21 образце общее содержание различных металлов и потенциально токсичных веществ. Изучение керна дало достаточно информации для проведения

кластерного анализа и выделения взаимосвязей между различными веществами. Авторы утверждают, что понижение УЭС на глубинах от 20 до 30 м связано с увеличением влажности, глинистости и содержания сульфидов. Самые низкие значения УЭС (менее 5 Ом·м) были получены в области насыщения хвостов, связанной с наибольшим содержанием металлов как в твердой фазе, так и в воде. Область с более низким УЭС, близкая к зоне трещиноватости, указывает на наиболее вероятный путь миграции веществ с подземными водами. Созданная авторами геофизическо-геохимическая модель позволила отобразить участки хвостохранилища, характеризующиеся высоким содержанием металлов и воды, которые представляют большой риск загрязнения.

Интересной особенностью данного исследования [Booterbaugh, Bentley, Mendoza, 2015] было обнаружение достоверной взаимосвязи между объемной электропроводностью и влажностью почвы, в то время как между объемной электропроводностью и электропроводностью флюида не наблюдалось корреляции. Таким образом, авторы сделали вывод, что только электропроводность скелета почвы будет влиять на данные электроразведки.

Комплексирование электромагнитного профилирования (ЭМП) и электротомографии может быть успешным при исследовании верхней части разреза до глубины первых метров [Балков 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 и др., 2021].

В результате анализа публикаций было выяснено, что «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. Также достаточно популярен и метод частотного профилирования. Однако комплексирование методов часто не предполагает четкой, систематизированной последовательности

действий, до сих пор не было предложено общей методики исследования техногенных систем (сульфидсодержащих отходов горнорудного производства) с применением методов электротомографии, электромагнитного профилирования, результатов геохимического опробования и аэрофотосъемки. В нашем случае исследуемые объекты имеют схожие геоэлектрические характеристики, контрастные по отношению к вмещающей среде, что способствует получению достоверных результатов. Одной характерной особенностью является небольшая мощность исследуемых отложений (от 2 до 20 м). В СССР и России огромные территории позволяли складировать отходы прямо 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» [Карин и др., 2017].

Аэрофотосъемка для решения задач экологии

Развитие относительно доступных беспилотных летательных аппаратов с камерами высокого разрешения позволяет получать информацию о рельефе, создавать ортофотопланы изучаемых участков, а также вести мониторинг состояния окружающей среды под воздействием естественного и антропогенного влияния.

В работе [Гагарин и др., 2017] авторы оценивают количество льда по результатам аэрофотосъемки (АФС) и сравнивают с результатами предыдущих исследований. Несмотря на значительное расхождение в объемах по данным разных методов, авторы считают применение АФС приемлемым.

В работе [Алёшин, 2017] авторы применяют АФС для построения цифрового рельефа тестового участка, в результате невязка планового положения точек составляет 15 мм, а в вертикальном направлении – не превышает 24 мм при допустимых 17 мм. При этом для решения подобных задач авторы считают такую точность недостаточной.

Оценку степени эрозии почв также можно проводить с применением АФС и построением цифровых моделей рельефа. Авторы работы [Гафуров, 2017; Степанова, 2017; Мальцев и др., 2018; Гафуров, 2019] считают применение АФС оправданным из-за большой производительности (до 5 км² за сутки), при этом отмечены и недостатки. В частности, к слабым сторонам предложенного подхода авторы относят необходимость проведения геодезического обоснования и чувствительность результатов съемки к оптике применяемой камеры.

Применение дистанционных методов зондирования и АФС для решения сугубо экологических задач описывается в работе [Чикунев, 2020]. Исследователи применяют обработанные изображения для изучения различных природных явлений, таких как трансформации ландшафта. Такой анализ помогает выявить скрытые связи и тенденции, наблюдающиеся на земной поверхности. В итоге создаются карты, отражающие динамику природных процессов, что позволяет улучшить методы инженерной защиты.

С появлением доступных моделей беспилотников возникла возможность проводить аэрофотосъемку и собирать данные о рельефе Земли с высоким уровнем детализации и точности всего за несколько минут [Быков и др., 2013; Быков и др., 2015; Parcero-Oubiña et al., 2016; Шеремецкая, 2018]. С использованием камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате, следует осуществлять съемку с разных углов, создавая плотную сетку со значительным уровнем перекрытия изображений. Компьютерные технологии открыли путь к автоматизации процессов фотограмметрии, которые раньше требовали много времени и усилий благодаря специализированному программному обеспечению. [Гук, Антипов, 2005; Тихонов, Акматов, 2018; Хлебникова и др., 2020; Варфоломеев и др., 2020]. Благодаря этому «получаемые в результате ортофотопланы и цифровые модели рельефа (в английской литературе Digital Elevation Model, DEM) позволяют сократить временные и финансовые затраты на поисковые археологические работы. В некоторых случаях получаемая ландшафтная модель местности, сопровождаемая детальной фотографической и топографической информацией, имеет высокую информативность, сопоставимую с информативностью геофизических методов исследования» [Балков, 2020].

Анализ материалов в данной области показал, что аэрофотосъемка широко применяется в международной практике для создания двумерных и трехмерных моделей зданий, объектов культурного наследия и памятников [Howland et al., 2014; Georgopoulos, 2014; López et al., 2016; Dubbini et al., 2016; Adami et al., 2019; Tzvetkov, 2020]. В настоящее время на беспилотниках иногда устанавливаются датчики, использующие оптические системы для измерения расстояния – технологии LiDAR [Liu, 2008]. Эта методика позволяет получать более детализированные цифровые модели местности [Poirier, 2020] и минимизирует влияние растительности на высотные карты [Themistocleous, 2019]. Исследования показывают, что полеты на небольшой высоте способствуют более качественному проникновению сквозь растительность, что, в свою очередь, улучшает качество

данных, поскольку отражения фиксируются от настоящей поверхности Земли, а не от крон деревьев [Risbøl et al., 2018].

Существует более десятка крупных производителей БПЛА во всем мире [Yurkevich etc., 2020]. Однако лидер - DJI (Китай, <https://www.dji.com>), одни из самых доступных и популярных моделей квадрокоптеров на момент проведения обзора (Рисунок 1) [Balkov et al., 2020]. Их популярность обусловлена в том числе «небольшими габаритами, малым весом, хорошей системой стабилизации и навигации, позволяющей проводить съемку даже в достаточно сильный ветер (до 5-6 м/с из личного опыта). Стоимость подобных аппаратов относительно не велика, поэтому они получили массовое распространение. Среди отрицательных качеств можно назвать небольшую продолжительность полета (около 10-15 минут), малую грузоподъемность, что не позволяет установить камеры высокого разрешения или дополнительное оборудование» [Балков и др., 2020].



Рисунок 1 - Одни из доступных и широко применяемых квадрокоптеров от компании DJI - Phantom 4 (слева), Mavic Air (в центре), а также от компании Xiaomi - Mi Drone (справа) [Балков и др., 2020]

Модели квадрокоптеров с высокой грузоподъемностью также активно используются в исследовательских работах. К числу таких разработок принадлежат устройства компании DJI и отечественной фирмы ГК Геоскан из Санкт-Петербурга (<https://www.geoscan.aero>), которая предлагает разнообразные профессиональные БПЛА (см. Рисунок 2). Эти аппараты способны поднимать грузы весом до нескольких килограммов, их стоимость значительно выше, однако время полета может достигать нескольких десятков минут. Например, квадрокоптер ГК Геоскан с профессиональной фотокамерой серии 401 имеет продолжительность полета 1 час. На такие шасси можно устанавливать не только

профессиональные камеры, но и другое оборудование, включая LiDAR, магнитометры или георадары [Liu, 2008; Гоглев, 2018].



Рисунок 2 - Квадрокоптеры грузоподъемностью более 1 килограмма от фирмы DJI (MATRICE 600 PRO (слева), DJI Inspire 2 (в центре)), и отечественная разработка Геоскан 401 (справа) [Балков и др., 2020]

Обобщая вышеуказанную обзорную информацию, стоит отметить, что в рассмотренных работах не хватает систематизированной последовательности действий для получения необходимого минимума информации, по которой в дальнейшем возможно построить модель исследуемого объекта. Как правило в работах описывается работоспособность выбранных методов, но не предлагается конкретная методика их применения, в том числе при комплексировании.

Глава 2. Выбранные методы для исследования хвостохранилищ

2.1. Метод электромагнитного профилирования

Частотное электромагнитное профилирование – метод бесконтактного исследования грунта; предельная глубина исследования изменяется в зависимости от частоты электромагнитного поля генераторной катушки. Аппаратура, реализующая метод электромагнитного профилирования, чаще всего представляет собой двух- или трехкатушечные приборы, максимальная глубина исследования которых не превышает первого десятка метров, но бывают другие варианты [Арзамасцев, 2015].

Аппаратура ЭМС, производимая серийно на территории России, [Манштейн и др., 2008] разработана в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и предназначена для малоглубинных (до 10 м) исследований (Рисунок 3). В рамках представленной работы аппаратура ЭМС использовалась для определения границ хвостохранилищ в плане, картирования кажущихся УЭС вещества хранилищ. Для компенсации прямого поля в устройстве зонда применяются две приемные катушки, расположенные по одну сторону генератора, включаемые последовательно встречно, т.е. с вычитанием наводимых в них ЭДС.

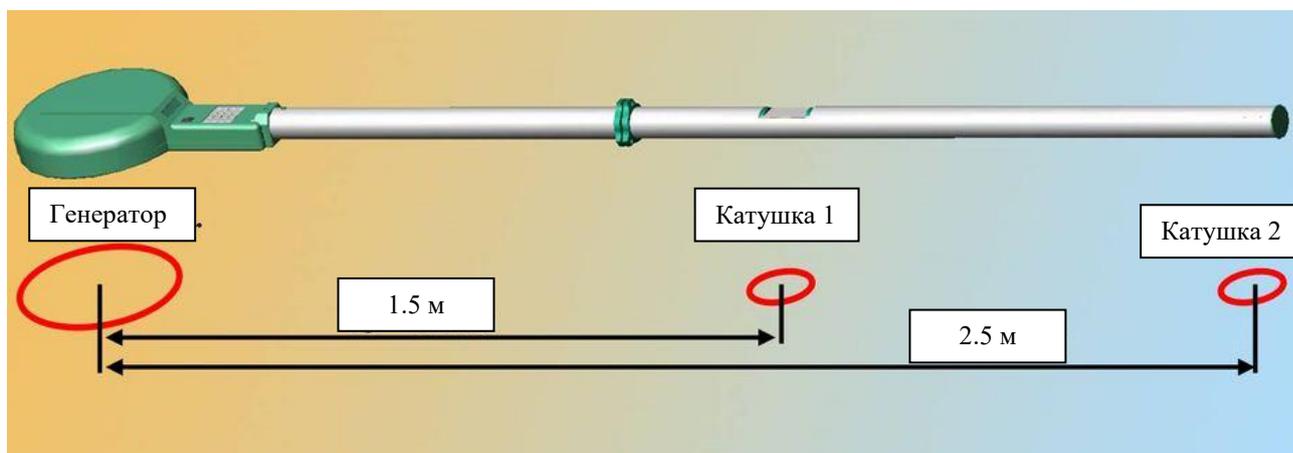


Рисунок 3 - Схема трехкатушечного зонда ЭМС

УЭС среды, на которых может корректно работать выбранная аппаратура, по заявлению производителя, составляет от первых единиц до 1000 Ом·м, при больших значениях сопротивлений уровень полезного сигнала близок к уровню собственных шумов, однако учитывая низкие УЭС вещества отходов, аппаратура ЭМС может быть успешно применена для картирования кажущихся удельных электрических сопротивлений и определения границ объектов в плане [Балков, 2013]. Несмотря на то что в аппаратуре реализован инструмент трансформации регистрируемого сигнала в кажущиеся УЭС, а не более достоверная инверсия данных (решение обратной задачи), в диапазоне УЭС от первых единиц до 50 Ом·м пересчитанные значения сигнала в кажущиеся УЭС близки к электросопротивлениям, измеренным методом электротомографии [Балков, 2011]. Трансформация регистрируемого сигнала в кажущиеся УЭС 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]

2.2. Метод электротомографии

Модифицированный метод вертикальных электрических зондирований, называемый электротомография [Куликов 2014, 2015, 2023; Бобачев и др., 2021; Куликов и др., 2021; Модин и др., 2020], основан на автоматизации процесса измерений за счет применения большого числа электродов (32-96 или более), подключаемых с головной станции с помощью электроразведочных многожильных кос. При этом станция содержит в себе как измеритель, так и генератор постоянного напряжения. «Такая технология на порядок увеличивает производительность и разрешающую способность исследований, особенно если аппаратура имеет несколько измерительных каналов, позволяющих измерять разность потенциалов одновременно с нескольких приемных линий. Встроенный генератор электроразведочной станции «Скала» имеет мощность 200 Вт» [Балков и др., 2012].

Максимальный выходной ток источника 2 А, максимальное напряжение 750 В. Шаг между электродами на косе выбирается исходя из поставленной задачи и размера исследуемого объекта. 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.

Принцип работы заключается в следующем. Когда две косы растянуты, и к каждому выводу подключен электрод, в станцию загружается протокол измерений, в котором содержится информация, какой электрод в каком порядке подключается к генераторным или измерительным выводам. Протокол измерений создается, исходя из возможностей аппаратуры, типа установки, особенностей объекта. На Рисунке 4 показано поле точек данных, к которым относят вычисленное сопротивление. После измерений данные переносятся на компьютер для дальнейшей инверсии, подбора подходящей модели среды. Результат

инверсии представляется в графическом виде, в форме разрезов и карт пространственного распределения УЭС.

Аппаратура Скала является аналогом зарубежной аппаратуры Iris Syscal pro switch 48/64, АВЕМ Terrameter LS и др. Аппаратурные комплексы Скала положительно 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].

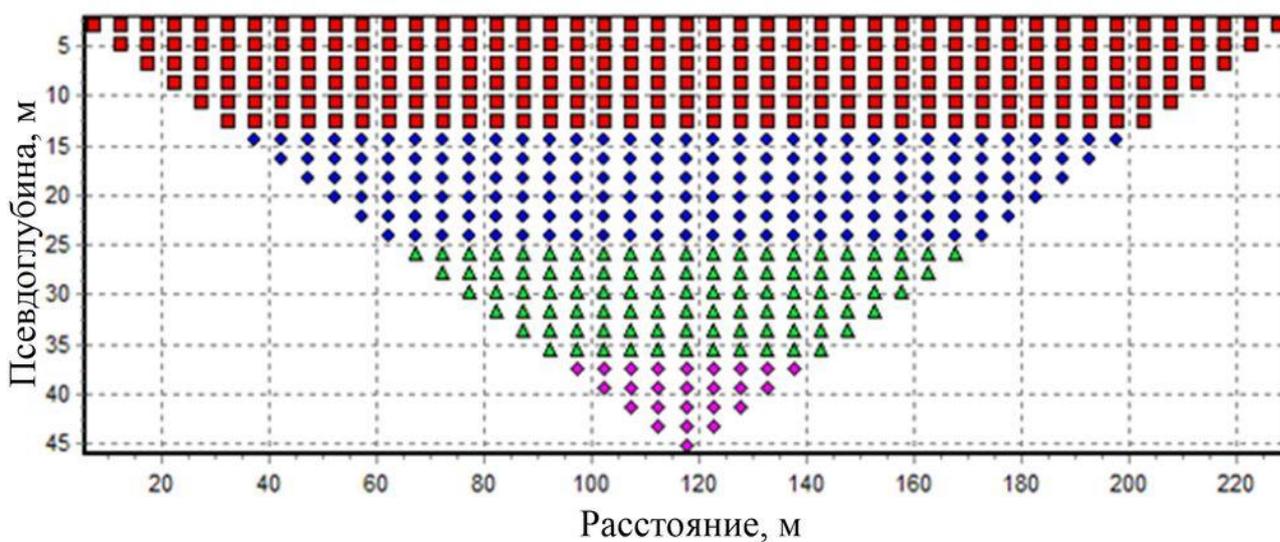


Рисунок 4 - Поле точек данных для аппаратуры «Скала», шаг между электродами 5 метров

2.3. Пробоотбор, пробоподготовка и химический анализ вещества отходов

Опробование вещества отходов проводили в шурфах глубиной 1.5-2 м. Слои для опробования (5-15 см) выбирались на основе визуального осмотра (различия в размере частиц, цвете, запахе вещества). Пробу весом 500 г отбирали пластиковым совком.

На месте из части каждой пробы изготавливалась суспензия (паста), для чего к твердому веществу добавлялась дистиллированная вода в пропорции два к одному. Этот метод хорошо известен в зарубежной литературе [Smart et al., 2002] и дает первичную информацию о составе жидкой фазы, формирующейся при контакте вещества отходов с атмосферной водой. Другая часть пробы запаковывалась в герметичные полиэтиленовые пакеты для транспортировки таким образом, чтобы сохранить влагу.

Величину удельной электропроводности (УЭП) в пастах определяли в полевых условиях прямым кондуктометрическим методом прибором Cond315i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Германия). Определение проводится в диапазоне 0-500 мСм/см с относительной погрешностью ± 0.5 %. Значения pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) измерены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001 («Эконикс-Эксперт», г. Москва) или pH/Т-метром HI 9025 С, HANNA Instruments, США. Перед измерением pH проведена калибровка прибора по стандартным растворам с известными значениями pH (3.56; 4.01; 6.86; 9.18). Точность измерений составляет ± 0.01 pH.

Влажность и гранулометрический состав образцов отходов определялись в лаборатории экспериментальной сейсмологии ИНГГ СО РАН к.т.н. Н.А. Голиковым.

В лабораторных условиях пробы твердого вещества высушивали при комнатной температуре, гомогенизировали и анализировали на содержание порообразующих элементов и примесных элементов (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn, Ba) методом рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) в

аналитическом центре ИГМ СО РАН на спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd, США) (аналитик Н. Г. Карманова). Микроэлементный состав проб определяли при помощи масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (Томск, аналитик Н. В. Федюнина) на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США) [Юркевич и др., 2023].

2.4. Аэрофотосъемка

Для проведения аэрофотосъемки применялся компактный квадрокоптер DJI Mavic Air. Время полета на одной батарее у данного квадрокоптера не превышает 10 минут, поэтому общая площадь исследования не должна превышать 0,25 км². Для покрытия больших площадей необходимо использовать высоту полета, превышающую 100 метров, однако разрешения камеры при полете на такой высоте может быть недостаточно для построения детальной карты высот дневной поверхности. Поэтому при проведении исследований высота полета выбиралась не более 50 м, скорость полета подбиралась таким образом, чтобы завершить съемку выбранного участка за время менее 10 минут. Перекрытие снимков в обоих направлениях составляло не менее 80 %. Съемка проводилась в безоблачную погоду в середине светового дня.

2.5. Программное обеспечение для обработки данных применяемых методов

При организации полетов применялось мобильное приложение Drone Harmony Plus (<https://droneharmony.com>) в процессе аэрофотосъемки. В результате такого съемочного процесса были получены сотни снимков, запечатлевающих дневную поверхность, которые обрабатывались с помощью программного обеспечения отечественного производства Metashape (Agisoft, Россия, <https://www.agisoft.com>). Графическое оформление и визуализация итоговых данных производились 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 использовалось 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. С целью дальнейшего развития методики была проведена одномерная инверсия данных аппаратуры ЭМС, полученных на

изучаемых объектах в тестовом варианте программного обеспечения EMS (Балков Е.В., Каминский А.Е.).

Для проведения инверсии данных электротомографии применяется ПО Res2dinv (Малайзия). Расчет значений кажущегося сопротивления производится методом наименьших квадратов [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.

Глава 3. Геоэлектрические и структурные модели хвостохранилищ

Вышеперечисленные методы и программы для обработки их данных были применены при исследовании четырех различных по типу формирования хвостохранилищ. В этой главе представлены описания изученных объектов, особенности их строения, результаты полевых наблюдений и авторской интерпретации полученных результатов.

3.1 Хранилище насыпного типа –Белоключевской отвал

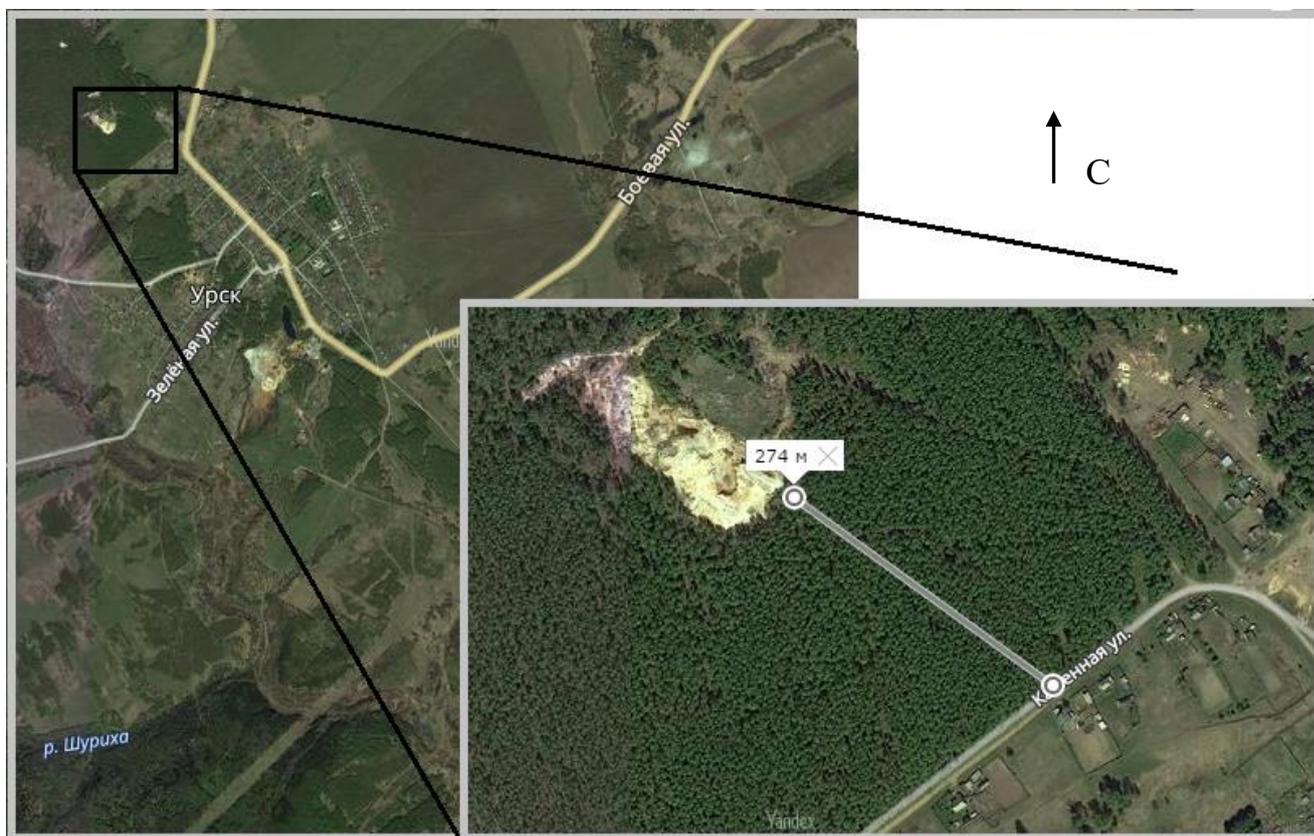


Рисунок 5 - Белоключевской отвал, пос. Урск Кемеровской области

Белоключевское хранилище отходов [Болгов, 1937] представляет собой насыпной отвал, сложенный преимущественно среднезернистым песком и суглинками рыжего цвета у поверхности, размерами в плане 200 x 170 м, высотой до 10 м. Отвал расположен в лесном массиве, площадка у его подножья используется местным населением для складирования бытовых отходов, через

отвал в Ю-В направлении проходит русло сезонных потоков в сторону жилых домов поселка (Рисунок 5).

Для оконтуривания насыпи и области ее поверхностного сноса был применен метод электромагнитного профилирования, по построенным картам распределения кажущегося УЭС было выделено три направления для профилей электротомографии. Всего были проведены исследования вдоль 4-х профилей (Рисунок 6). Профили 3 и 4 с шагом между электродами 5 м проложены через западное тело насыпи и вдоль Ю-В борта соответственно. Профили 1 и 2 выполнены с шагом 0.3 м с целью большей детализации и разделения толщи насыпи по УЭС. В результате проведенных измерений были сделаны предварительные выводы о распределении вещества в теле насыпи и намечены точки для отбора проб и постановки шурфов. Отбор проб производился по площади до глубины 0.5 м. Схема расположения профилей и точек отбора проб показана на Рисунке 6. Шурф, расположенный на отметке 5 м по профилю 1, имел глубину 1.3 м и вскрыл перекрытый отходами слой с остатками растительности. Для измерений методом электротомографии были использованы установки Шлюмберже и дипольно-осевая. Дипольно-осевая установка применялась для исследований по профилю 2, расположенному на субвертикальной стенке отвала в центре исследуемого участка с целью расчленения разреза по вертикали с высокой детальностью.

Серия параллельных профилей, выполненная в Ю-З части отвала, позволит построить трехмерную геоэлектрическую модель фрагмента исследуемого объекта. На Рисунке 6 показана схема системы наблюдения.

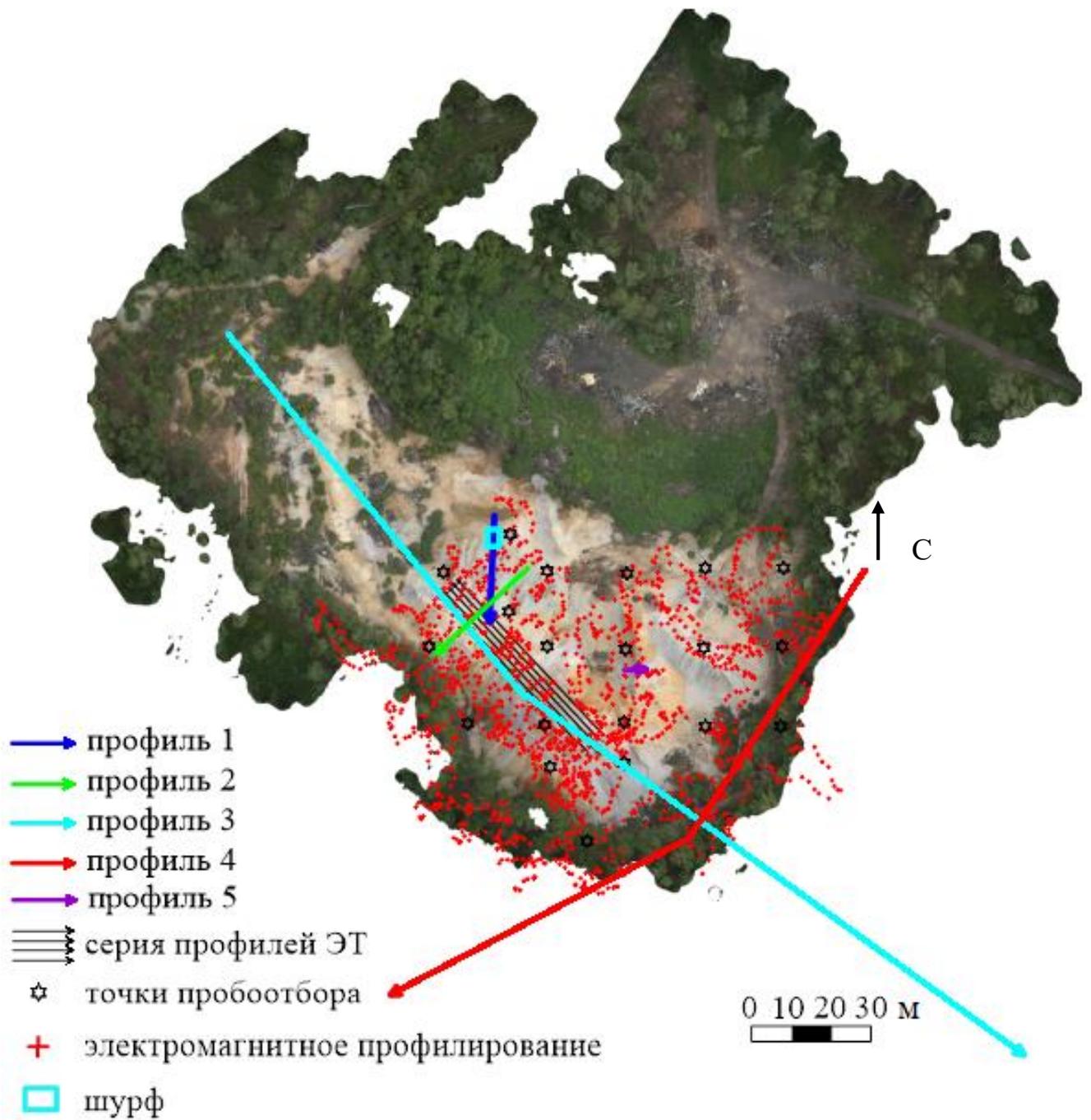


Рисунок 6 - Схема расположения профилей на Белоключевском отвале

По данным ЭМП пониженный уровень значений электрического сопротивления приурочен к телу насыпи (Рисунок 7). В свою очередь, электросопротивление вмещающей среды, наоборот, характеризуется

относительно высокими значениями УЭС (30-50 Ом·м относительно 2-10 Ом·м для хвостов).

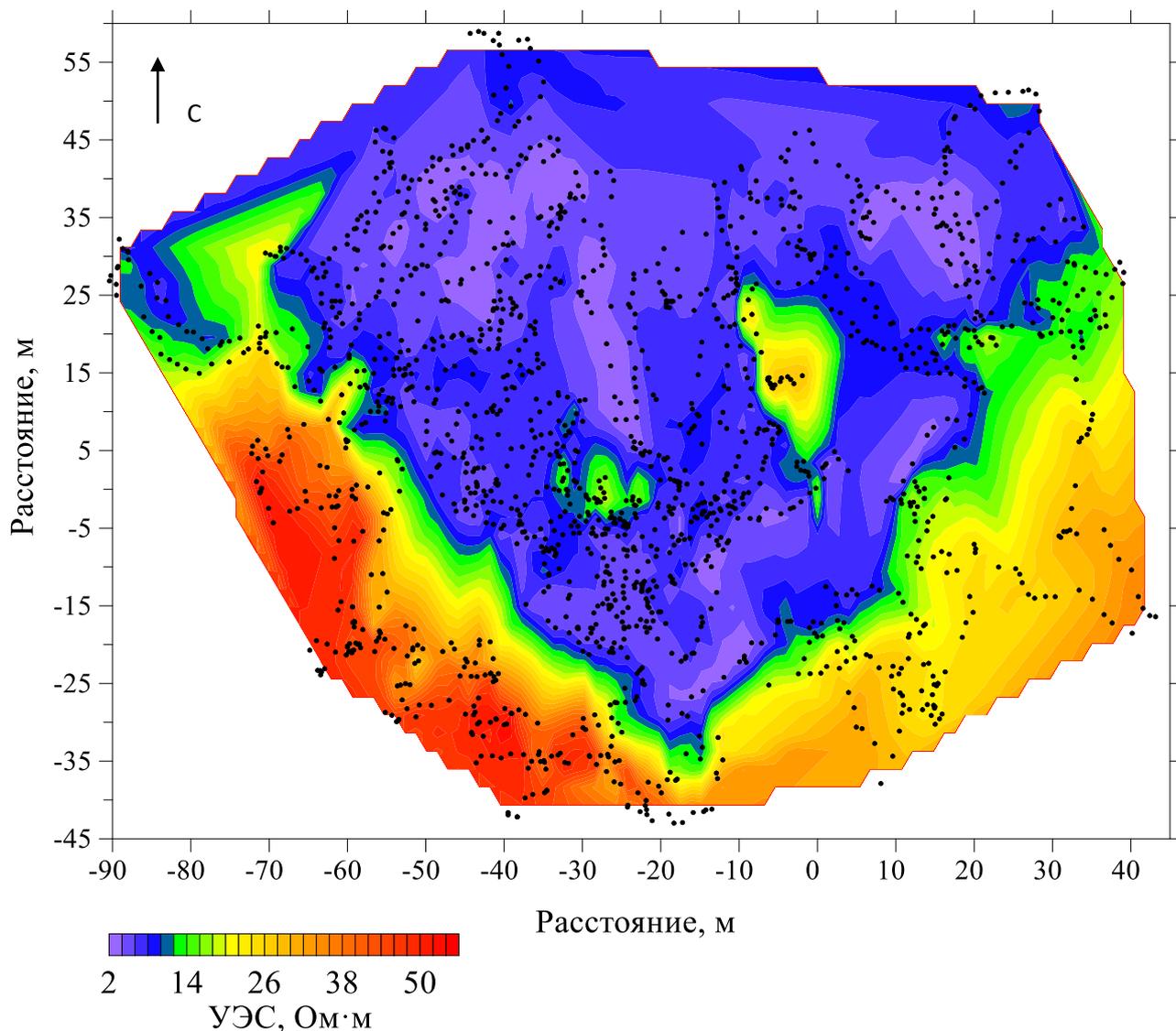


Рисунок 7 - Карта распределения УЭС по данным ЭМП на Белоключевском отвале

Поскольку регистрируемый сигнал аппаратуры ЭМС дает представление об изменении электросопротивления в среде до глубины 6-7 метров, можно сделать вывод, что представленная карта распределения УЭС (Рисунок 7) показывает отсутствие зон пониженного (менее 10 Ом·м) сопротивления во вмещающей среде возле насыпи. Это связано с отсутствием дренажа

высокоминерализованных растворов с тела насыпи в вышеуказанном диапазоне глубин.

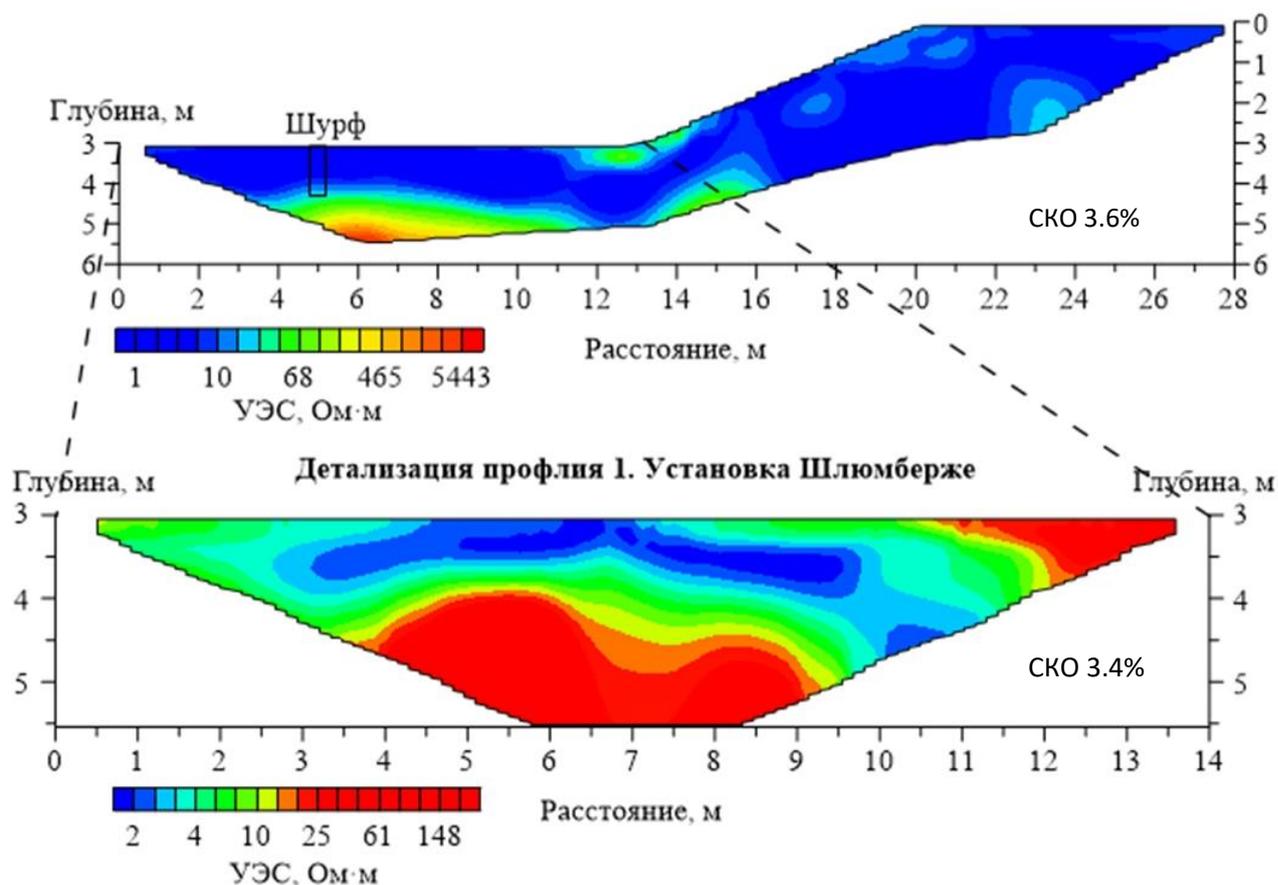


Рисунок 8 - Геоэлектрические разрезы Белоключевского отвала по профилю 1 и его детализация

Профиль 1, направленный с СЗ на ЮВ, расположен в зоне самых низких значений УЭС по данным ЭМП в СЗ части отвала (Рисунок 8). Перепад высот вдоль профиля достигает трёх метров. Техногенная насыпь характеризуется электросопротивлением в диапазоне от первых единиц до 50 Ом·м (Рисунок 8). Как видно из детализированного разреза по профилю 1 (Рисунок 8), отходы дифференцируются на два геоэлектрических слоя: 1) в диапазоне УЭС от единиц до 10 Ом·м; 2) с УЭС 10-50 Ом·м.

Как было отмечено ранее, шурф, заложенный на 5-м метре по профилю 1 (Рисунок 8), достиг глубины 1.3 м и вскрыл перекрытый отходами слой почвы,

предположительно поверхность, на которой покоится тело насыпи. Строение шурфа по данным визуальных наблюдений (текстура, влажность) согласуется с результатом инверсии, полученным для профиля 1. Положение границы «тело насыпи-естественный грунт» можно провести по изолинии 14 Ом·м (глубина 4-5 м, Рисунок 8). В остальном же насыпь достаточно однородна. Аномалия, обозначенная оттенками зеленого цвета, на 12-14 м по профилю связана с локальной осыпью материала насыпи вниз со склона, в рельефе не учтена.

Профиль 3 пересекает тело насыпи с запада на восток и простирается вниз по естественному склону на расстояние 170 м от края объекта. На Рисунке 9 показан геоэлектрический разрез по профилю 3.

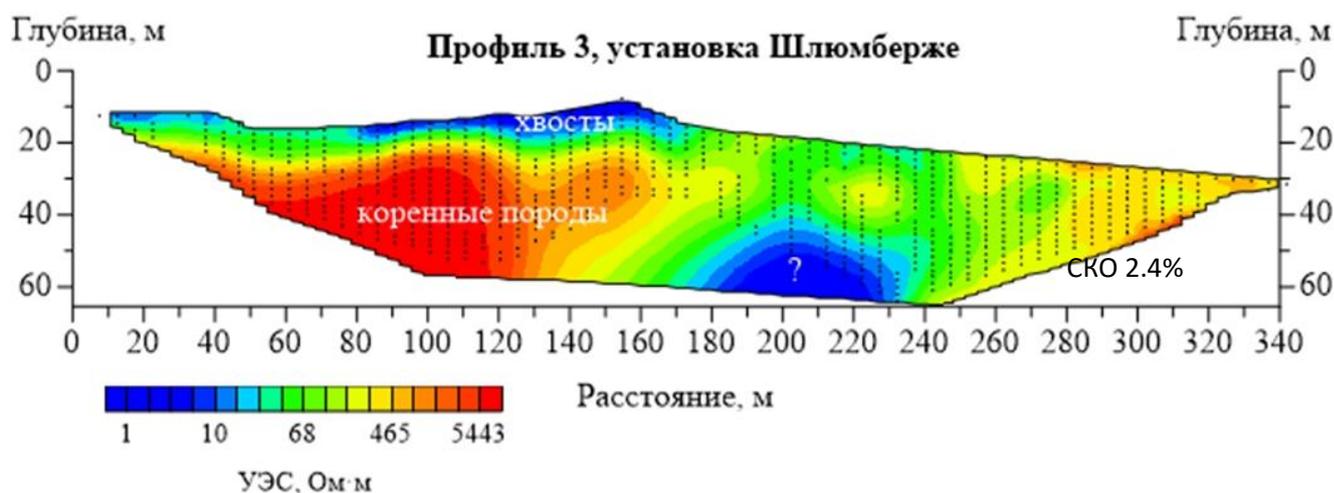


Рисунок 9 - Геоэлектрический разрез, пересекающий Белоключевской отвал с СЗ на ЮВ

Мощность насыпных грунтов на исследуемом участке редко превышает 10 м. Под телом насыпи выделяются породы с высокими (более 500 Ом·м) сопротивлениями. Профиль 3 не показал наличия дренажных каналов под насыпью.

Профиль 4 проходит в непосредственной близости от исследуемой насыпи с СВ на ЮЗ отвала вдоль восточной части. Положение профиля выбиралось с целью определения наличия дренажа высокоминерализованных растворов с тела

насыпи в грунтах на глубинах свыше 6-7 м. На Рисунке 10 приведен геоэлектрический разрез вдоль профиля 4. Низкоомные аномалии (1-10 Ом·м), вероятно, связаны с каналами фильтрации минерализованных растворов с тела насыпи, в свою очередь, вмещающая среда имеет сопротивление свыше 200 Ом·м. Предполагаемые каналы фильтрации расположены на глубине от 10 м и глубже, на картах по данным ЭМП они не определяются, поскольку глубина исследований аппаратуры ЭМС не превышает 7 м.

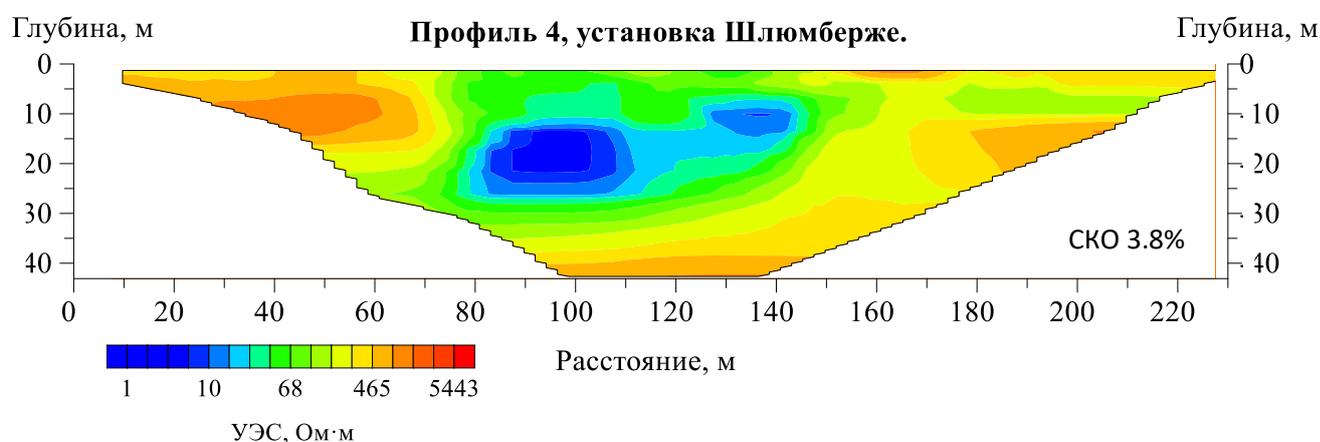


Рисунок 10 - Геоэлектрический разрез с СВ на ЮЗ часть Белоключевского отвала

На профиле 5 по субвертикальной стенке насыпи в центральной части исследуемой площади (Рисунок 11) предполагалось выделить зональность, связанную с различной степенью окисленности материала. Однако по значениям измеренных с поверхности УЭС тело насыпи практически однородно.

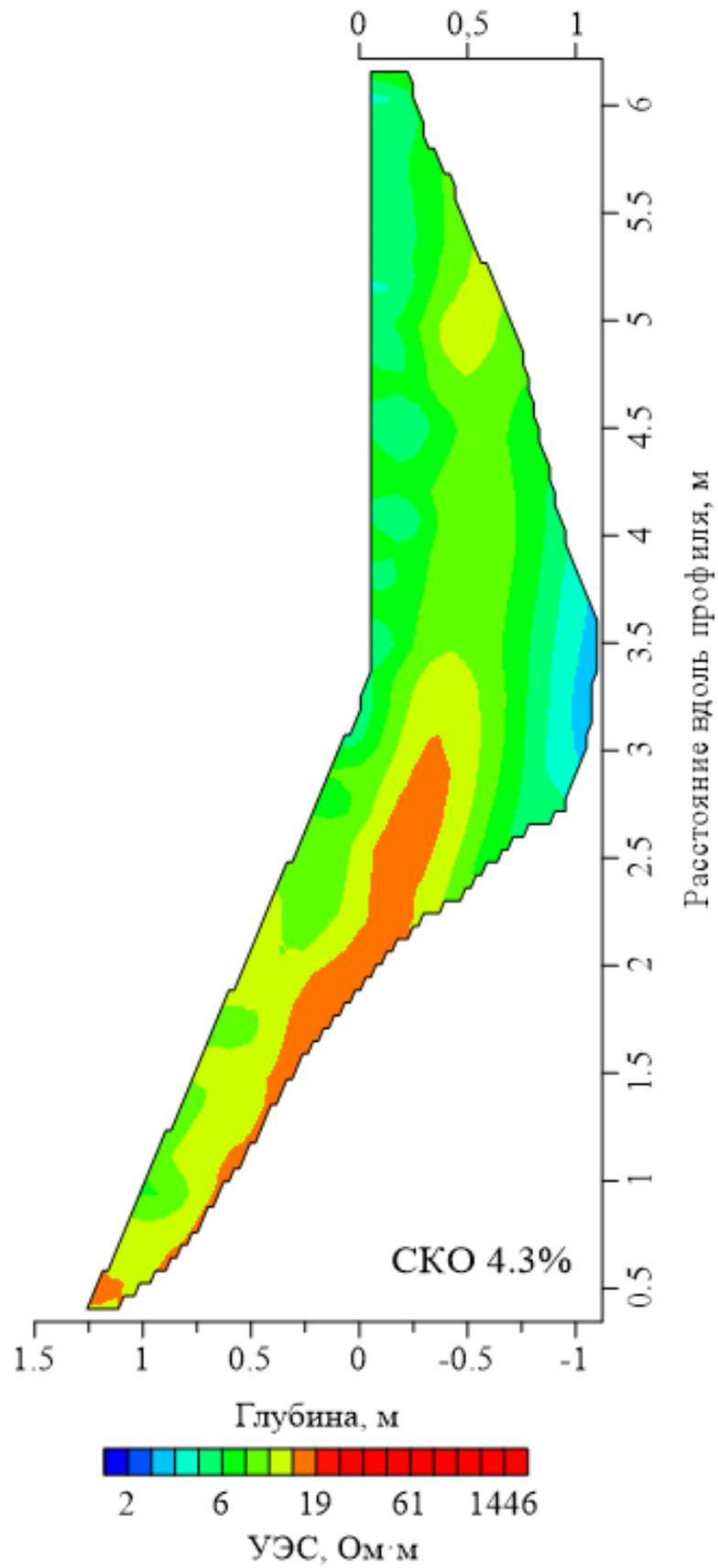


Рисунок 11 - Разрез по профилю 5 на субвертикальной стенке насыпи в центральной части Белоключевского отвала

Серия параллельных профилей дает информацию, достаточную для построения трехмерной модели участка отвала, модель представлена на Рисунке 12, «изоповерхность желтого цвета ограничивает объем среды с удельным электросопротивлением 20 Ом·м, вещества с большим сопротивлением на модели специально выполнены прозрачными, чтобы можно было визуально оценить соотношение объемов веществ с разным УЭС. Объем веществ с сопротивлением менее 20 Ом·м составляет 2126 м³» [Карин и др., 2012].

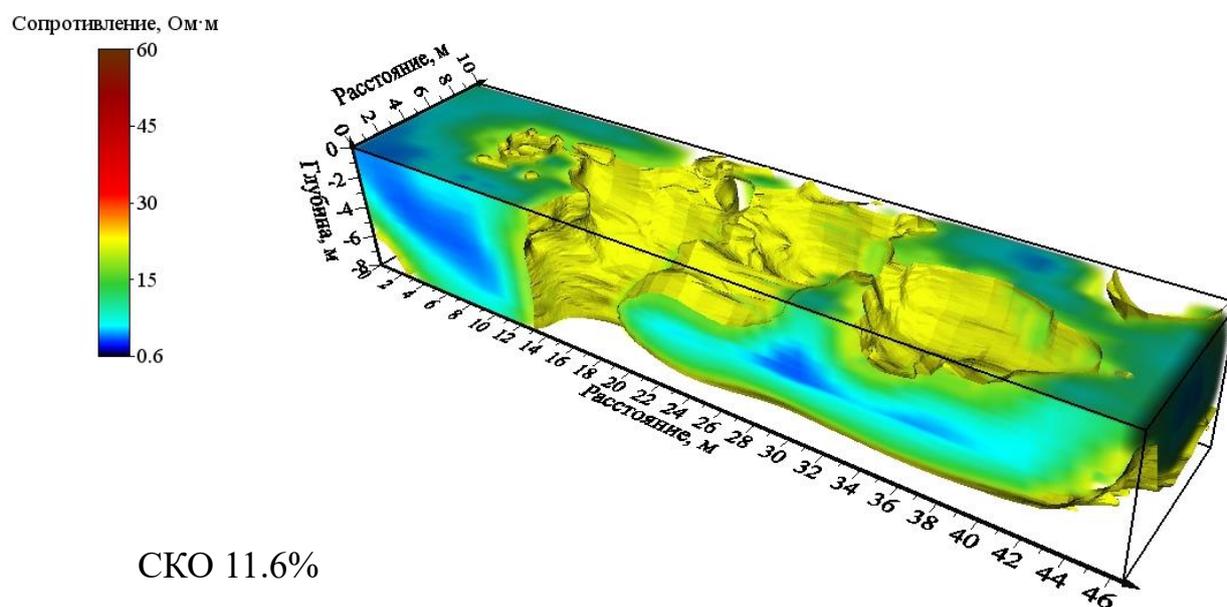


Рисунок 12 - Трехмерная геоэлектрическая модель участка Белоключевского отвала [Карин и др., 2012]

Структурные модели насыпного хвостохранилища Белоключевской отвал

Поскольку Белоключевское хвостохранилище представляет из себя горы насыпанного на нетронутую дневную поверхность материала, и электросопротивление отходов значительно отличается от сопротивления расположенных ниже пород, итоговая модель содержит два слоя.

Наиболее интересный слой отходов и подстилающий горизонт (Рисунок 13). Также на разрезе, пересекающим направление естественного стока атмосферных вод, указана зона дренирования высокоминерализованных растворов под дневной поверхностью.

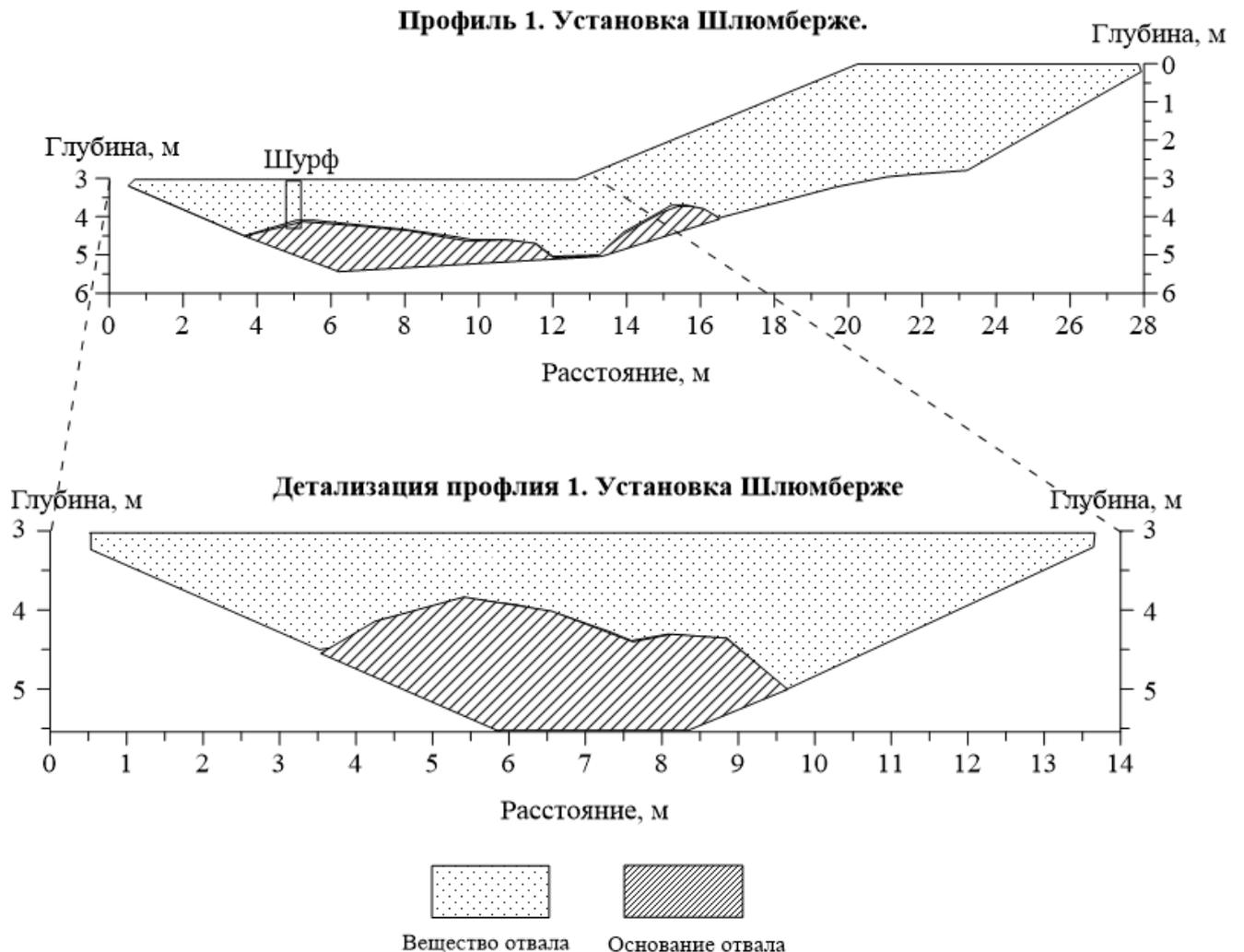


Рисунок 13 - Структурная интерпретация геоэлектрических разрезов на Белоключевском отвале

Максимальная мощность отходов не превышает 10 м. Отсутствует водоупорный горизонт под толщей складированного материала. В результате атмосферные осадки, прошедшие слой отходов, насыщаются потенциально токсичными веществами и дренируются ниже по склону. Область дренирования в поперечном сечении имеет площадь около 1000 м².

Структурная интерпретация, сделанная после привязки данных электроразведки к результатам шурфовки, позволила оконтурить зону дренирования кислых растворов в теле отвала (Рисунок 14).

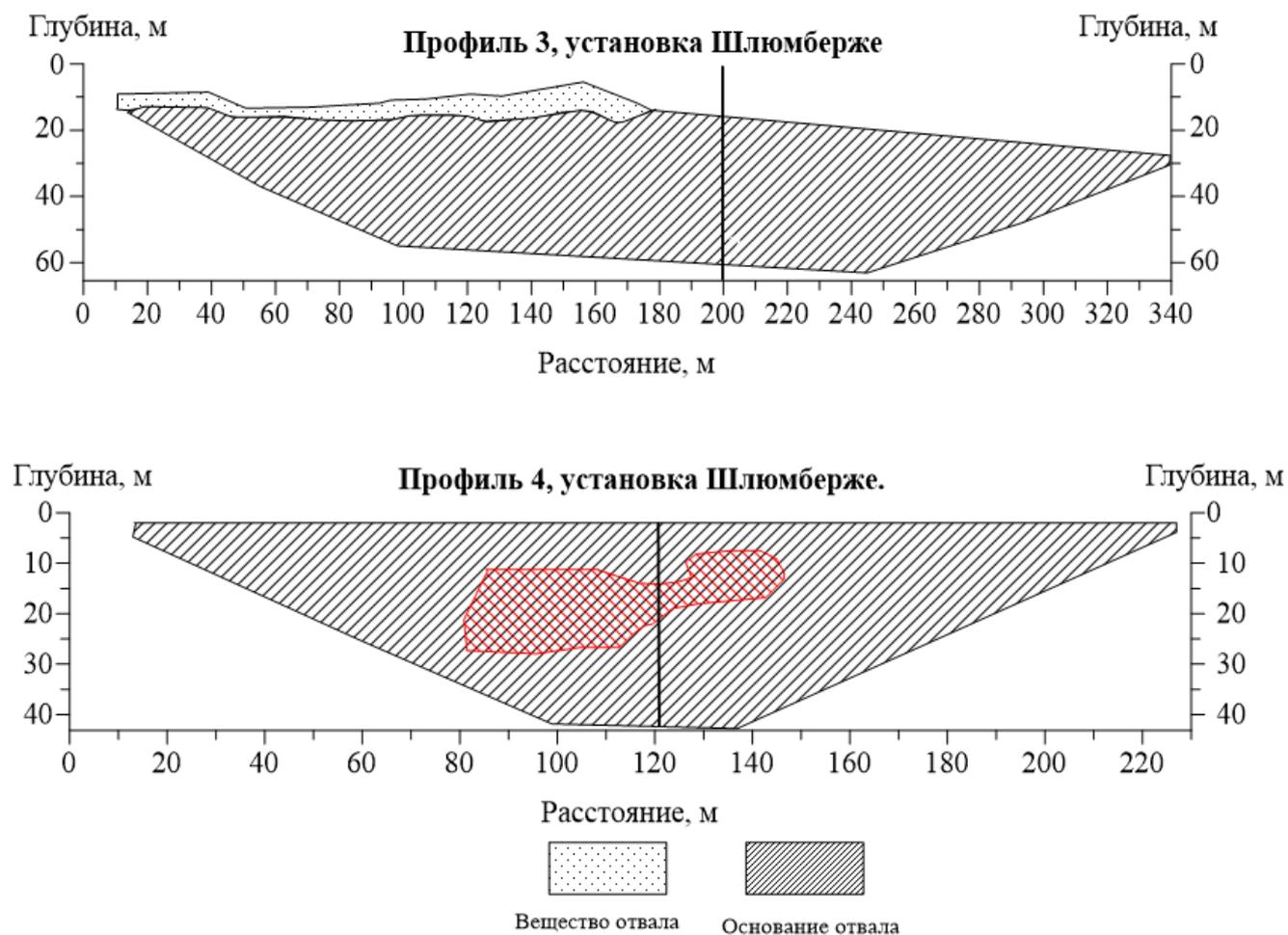


Рисунок 14 - Структурная интерпретация разрезов на Белоключевском отвале. Красная зона – область дренирования высокоминерализованных отходов под дневной поверхностью. Вертикальная линия – пересечение профилей 3 и 4

Результаты геохимического опробования

Значения рН, измеренные в пастах, варьируют в диапазоне от 1.95 до 3.45 и только в одной точке достигают 5.73 единиц (Таблица 1, 2). Окислительно-восстановительный потенциал изменяется от 508 до 798 мВ. Влажность среды не превышает 20 %, минимальные значения не опускаются ниже 7 %. Процентное содержание фракции от 0.01 до 9 мкм не превышает 17 %, фракция 10-200 мкм имеет наибольший вклад (от 32 до 61 %), фракция от 201 до 1000 мкм занимает 15 %, в то время как на фракцию с размером частиц более 1 мм в среднем приходится 28 %, но не выше 38 % в большинстве образцов.

Проведенная площадная геохимическая съемка на Белоключевском отвале позволила провести корреляцию геохимических данных как между собой, так и с данными ЭМП.

В Таблице 2 приведены коэффициенты корреляции между различными параметрами среды. Обратная зависимость электрохимического потенциала и УЭС говорит о большем содержании агрессивных веществ в областях пониженных сопротивлений. Однако, корреляция массы вещества и УЭС в зависимости от влажности практически одинаковая, следовательно УЭС растет при увеличении плотности вещества. Об этом же свидетельствует слабая обратная корреляция между УЭС по данным частотного зондирования и влажностью. Корреляция между рН и сопротивлением позволяет предположить, что минимальное электросопротивление стоит ожидать в местах максимальной окисленности материала.

Таблица 1 - Данные площадных наблюдений на Белоключевском отвале

Название образца	pH	Eh, мВ	УЭП, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Влажность %	% фракции 0.01-9 мкм	% фракции 10-200 мкм	% фракции 201-1000 мкм	% фракции 1-3 мм	УЭС (ЭМП), Ом·м
ВКР-1	3.2	723	110	9	10	39	16	35	9.2
ВКР-2	2.42	672	1850	17	11	50	21	17	6.7
ВКР-3	2.38	743	1846	13	11	53	17	19	4.3
ВКР-4	5.73	610	110	7	11	61	14	14	5.5
ВКР-5	3.37	508	110.6	11	12	54	12	22	24.2
ВКР-6	3.45	685	77	7	10	44	29	17	12.3
ВКР-7	2.46	748	1770	10	15	53	11	21	12.7
ВКР-8	3.06	673	336	17	17	49	9	26	6.4
ВКР-9	2.32	773	2000	14	10	37	16	37	8.6
ВКР-10	1.95	765	7300	14	12	38	20	30	6.9
ВКР-11	3.44	689	103.5	13	8	47	23	22	4.8
ВКР-12	3.34	729	108.4	16	12	39	18	31	6.9
ВКР-13	2.66	758	935	13	8	32	7	54	12.8
ВКР-14	2.95	798	1230	16	10	32	9	49	5.0
ВКР-15	2.28	725	3610	11	11	52	17	20	6.1
ВКР-16	2.54	774	2410	11	11	36	14	38	5.3
ВКР-17	2.24	751	1860	12	14	47	13	26	3.4
ВКР-18	1.95	665	6520	9	11	51	23	15	4.3
ВКР-19	2.51	713	1030	7	12	51	13	24	6.9
ВКР-20	2.72	685	660	20	9	48	0	43	7.7

Таблица 2 - Коэффициенты корреляции различных параметров среды, по данным Таблицы 1

	pH	Eh, мВ	УЭП, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Влажность, %	фракция 0,01-9 мкм	фракция 10-200 мкм	фракция 201-1000 мкм	фракция 1-3 мм	УЭС, Ом·м(ЭМП)
pH	1								
Eh, мВ	-0.5	1							
УЭП, $\mu\text{S}/\text{cm}$	-0.61	0.27	1						
Влажность, %	-0.29	0.18	-0.01	1					
фракция 0,01-9 мкм	-0.11	-0.07	0.08	0.04	1				
фракция 10-200 мкм	0.3	-0.67	-0.06	-0.28	0.35	1			
фракция 201-1000 мкм	-0.01	-0.07	0.27	-0.43	-0.15	0.09	1		
фракция 1-3 мм	-0.19	0.53	-0.13	0.44	-0.36	-0.82	-0.61	1	
УЭС, Ом·м по данным ЭМП	0.44	-0.69	-0.35	-0.11	0.04	0.2	-0.23	-0.02	1

Выводы

В результате проведенных исследований Белоключевского отвала были построены геоэлектрические и структурные модели хранилища. Объем отходов с УЭС до 20 Ом·м составил 2100 м³ для участка по данным ЭТ, а площадь предполагаемого канала фильтрации 1000 м². Установлены корреляционные связи значений УЭС, определяемых по данным электроразведочных методов, с рН, размером частиц и окислительно-восстановительным потенциалом. Что подтверждает эффективность применяемых методов [Карин и др., 2020].

3.2 Хранилище руслового типа– Талмовские пески

Хранилище отходов Талмовские Пески относится к горно-обогатительному комбинату, расположенному в г. Салаир (Рисунок 15). Характеристика руд и процессов их переработки описаны в работе [Бортникова и др., 2003].

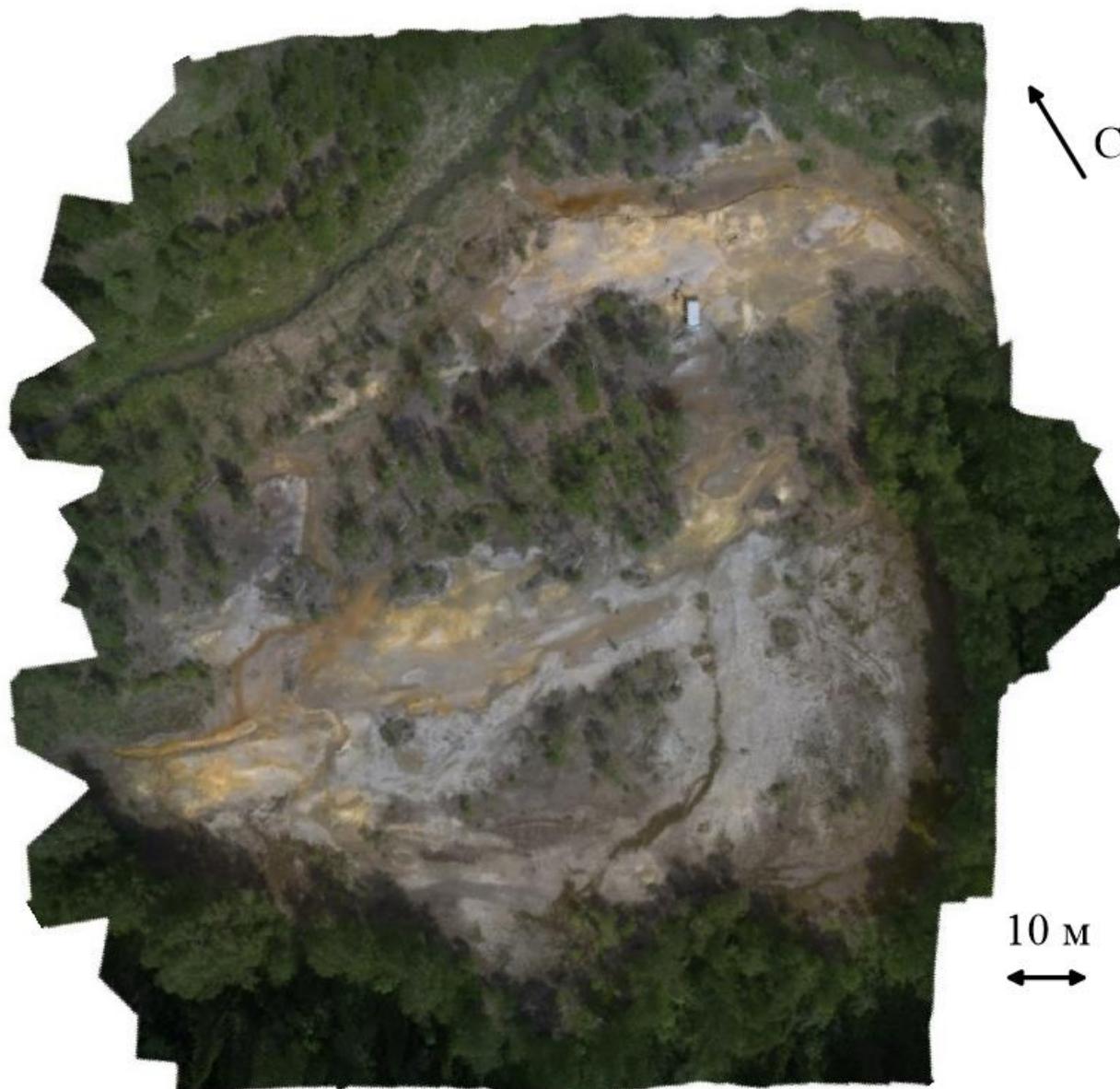


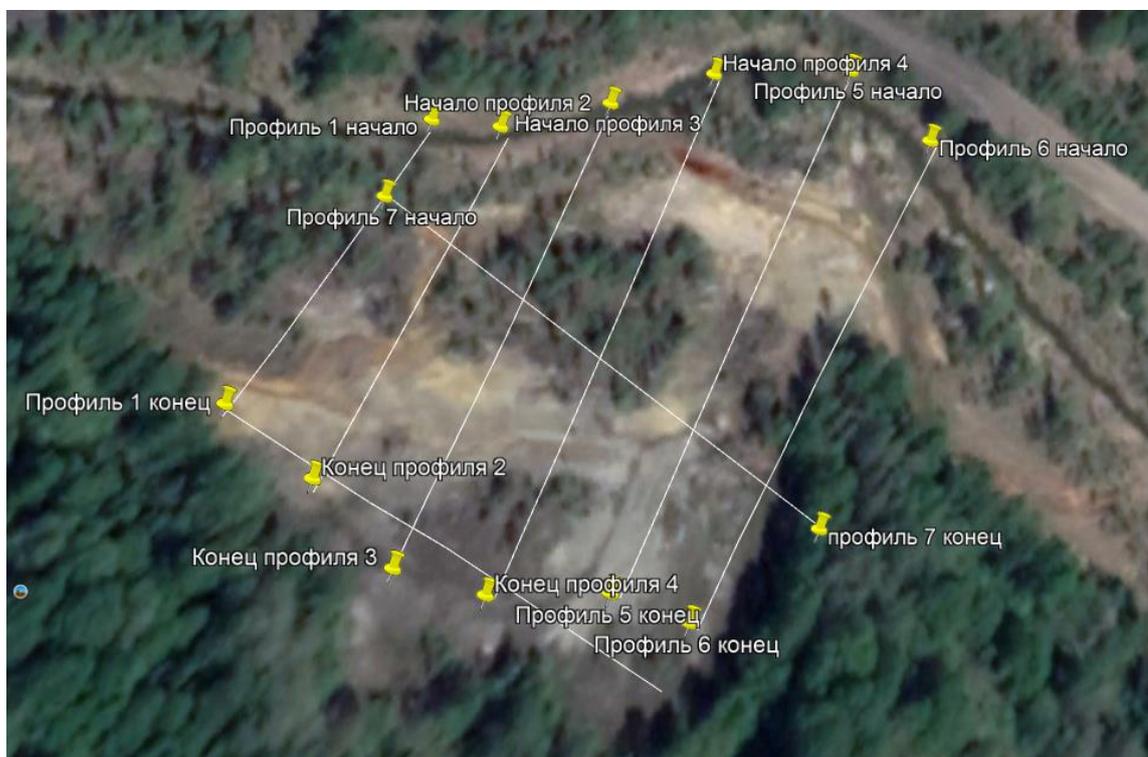
Рисунок 15 - Ортофотоплан хранилища отходов ГОК - Талмовские пески

Особенностью формирования этого хранилища отходов является то, что «в период 1932 - 1942 г. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло р. Мал. Талмовая в виде ленты протяженностью 8 км и

шириной 30 м. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. По предварительной информации мощность техногенных отложений не превышает 3 м. Периодически (сезонно) происходит затопление осушенной части. Поровые воды, находящиеся в межзерновом пространстве вещества хранилища, легко смешиваются с речными водами и таким образом идет интенсивный вынос растворенных форм металлов в речную сеть в дополнение к механическому сносу вещества» [Бортникова и др., 2003; Бортникова, 2006; Bortnikova et al., 2013].

Стоит также отметить, что «содержание металлов (Zn + Pb) и барита в веществе хвостохранилища превосходит таковые в отрабатываемых в настоящее время рудах, что объясняется более высокими содержаниями полезных компонентов в верхних частях рудных тел, с которых и началась разработка месторождения» [Бортникова и др., 1996; Бортникова, 2006].

Работы на хвостохранилище Талмовские пески проводились в два этапа в 2012 и 2019 годах. На первом этапе были проведены тестовые измерения аппаратурой ЭМС и Скала для оценки ее чувствительности к изменению УЭС на выбранном объекте. Хвостохранилище изучалось в крест течения реки. Вдоль двух профилей были сделаны измерения аппаратурой электромагнитного профилирования и аппаратурой Скала 48. Привязка точек физнаблюдений по высоте производилась с помощью барометрического датчика. Общая протяженность профилей – 200 м (Рисунок 16). В 2019 году были проведены измерения по 6 профилям с шагом в 5 м между электродами (схема наблюдений представлена на Рисунке 16 снизу), по результатам была построена трехмерная геоэлектрическая модель.



Рисунке 16 - Схемы наблюдений на объекте Талмовские пески в 2012 (вверху) и 2019 годах (внизу)

Разрезы по профилям 2012 года представлены на Рисунке 17. Их протяженность – 154 и 160 метров, разрез пересекает толщу намывных естественным течением реки отложений Малая Талмовая, в которую сбрасывали отходы ГОКа. По данным электротомографии мощность насыщенных высокоминерализованными флюидами пород (сопротивление до 50 Ом·м) достигает 13 - 15 м к концу профиля. Псевдоразрез по данным частотного профилирования на разных частотах показывает наличие областей пониженного УЭС (5-15 Ом·м) на интервале от 10 до 85 м, однако с глубиной электрическое сопротивление на разрезе по данным частотного профилирования меняется незначительно. Наблюдается соответствие между расположением в плане аномалий пониженных значений УЭС по данным двух методов. Однако, электротомография позволяет выделить на разрезе предполагаемую поверхность, на которую были намывты высокоминерализованные пески. Ее можно провести по изолинии в 50 Ом·м (Рисунок 17Б).

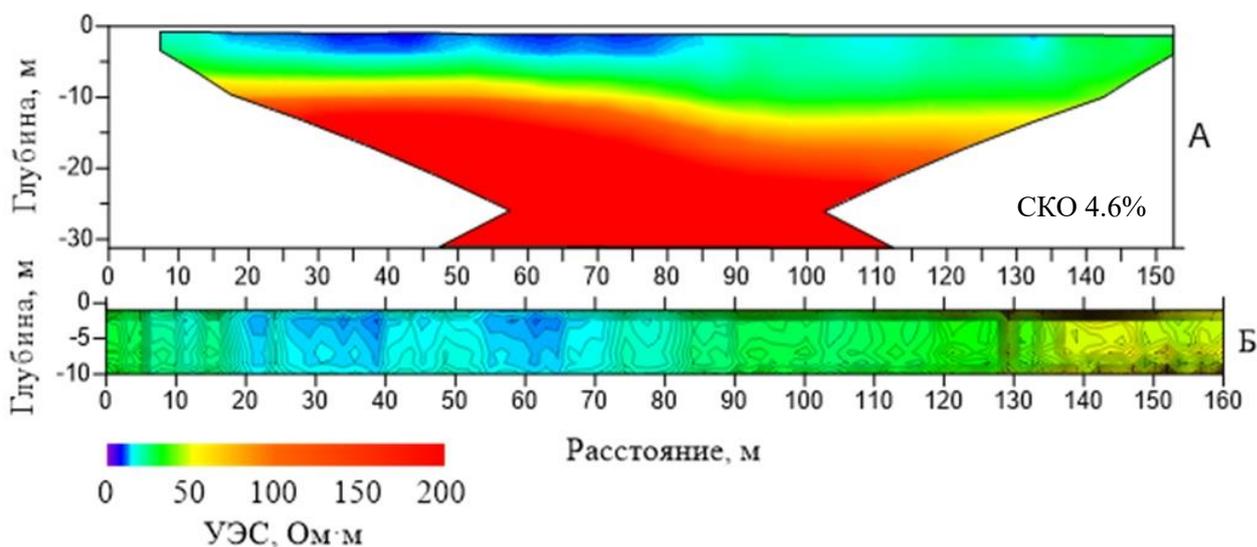


Рисунок 17 - Геоэлектрические разрезы по профилю 2. А – Электротомография, Б – ЭМП

Детальный разрез с учетом рельефа на Рисунке 18 (шаг исследования 30 см) позволяет дифференцировать отложения песков и выделить

геоэлектрический слой мощностью около 2 м. Низкие (менее 15 Ом·м) сопротивления этого слоя, предположительно, обусловлены наличием высокоминерализованных растворов, связанных с уровнем воды в реке Малая Талмовая. Псевдоразрез по данным электромагнитного профилирования также показывает наличие низкоомной зоны, но скорость проведения исследования этим методом выше, чем у ЭТ. Поэтому на первом этапе исследований предпочтительней использовать метод электромагнитного профилирования для построения карт, с целью выделения зон пониженного УЭС в плане, а затем более детально их изучать методом электротомографии.

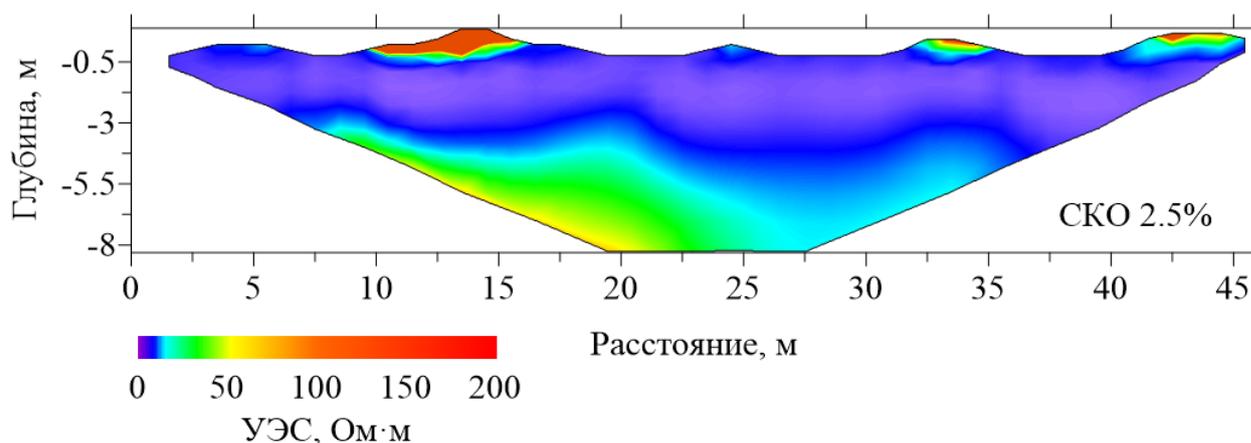


Рисунок 18 - Разрез по профилю 1 на хвостохранилище Талмовские пески по данным электротомографии

В 2019 году при проведении исследовательских работ была задействована аэрофотосъемка для построения карты высот и ортофотоплана объекта. На Рисунке 19 показан ортофотоплан хранилища Талмовские пески, местами покрытого растительностью, перепад высот составляет не более 2 м между нижней и самой верхней точками.

Анализируя ортофотоплан, можно выделить пути поверхностного стока высокоминерализованных веществ с тела хранилища в русло реки Малая Талмовая (Рисунок 19). Основной сток проходит по старым руслам реки, которыми изрезана поверхность намывных песков. На ортофотоплане видно

изменение цвета жидкости от светло-коричневого до темно-коричневого и рыжего, что говорит о повышении концентрации вымываемых веществ с песчаного тела.

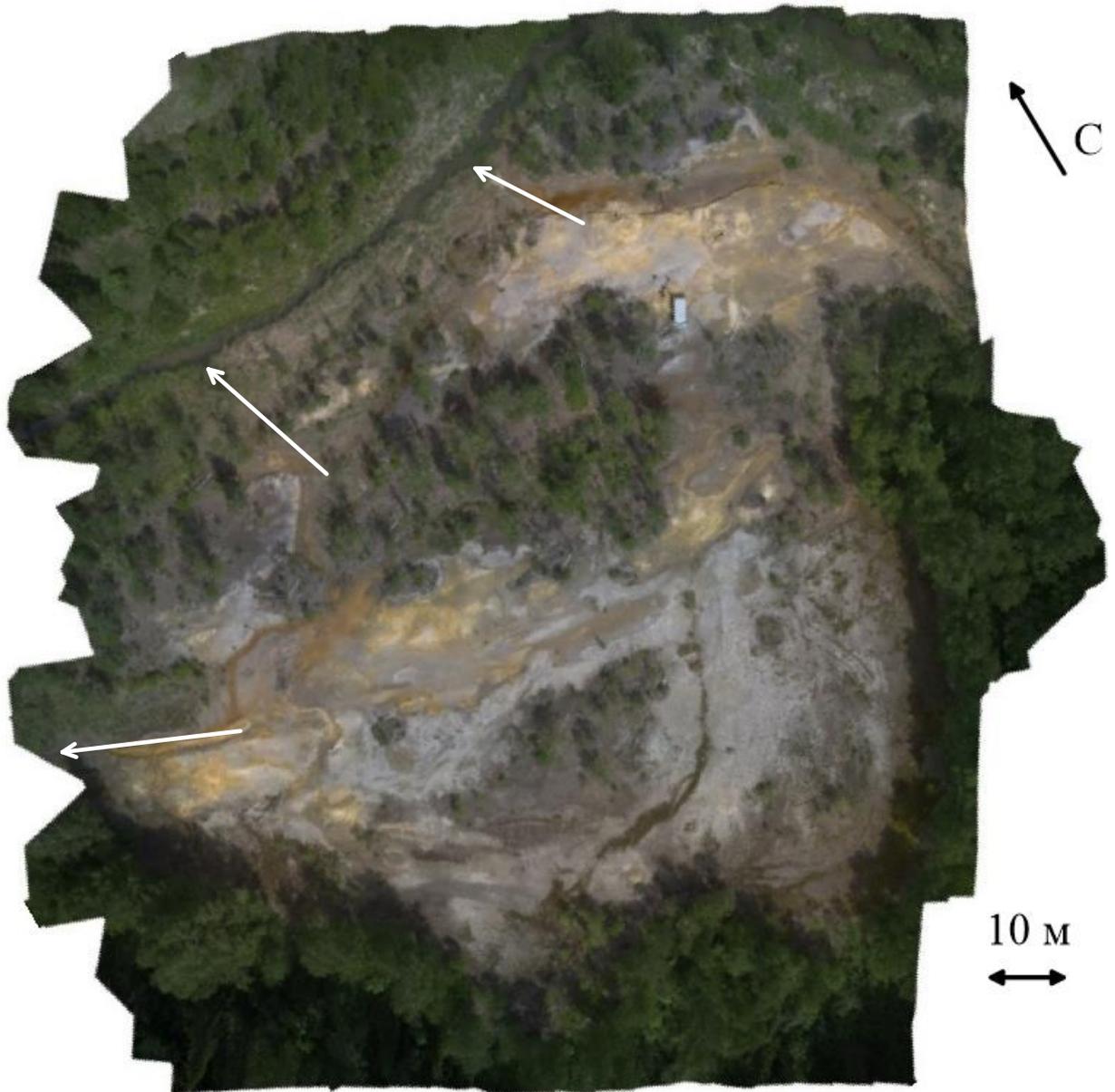


Рисунок 19 - Ортофотоплан хвостохранилища Талмовские пески. Поверхностный сток в реку Малая Талмовая обозначен белыми стрелками.

На Рисунке 20 представлена трехмерная геоэлектрическая модель, созданная на основе данных 7 профилей (схема их расположения изображена на Рисунке 18). Изоповерхность голубого цвета соответствует нижней

границе вещества хвостов с сопротивлением 20 Ом·м. Общая площадь исследований методом электротомографии составила 14000 м². При этом объем веществ с диапазоном сопротивлений до 20 Ом·м составляет около 47700 м³, а с сопротивлением от 20 до 50 Ом·м – более 53300 м³.

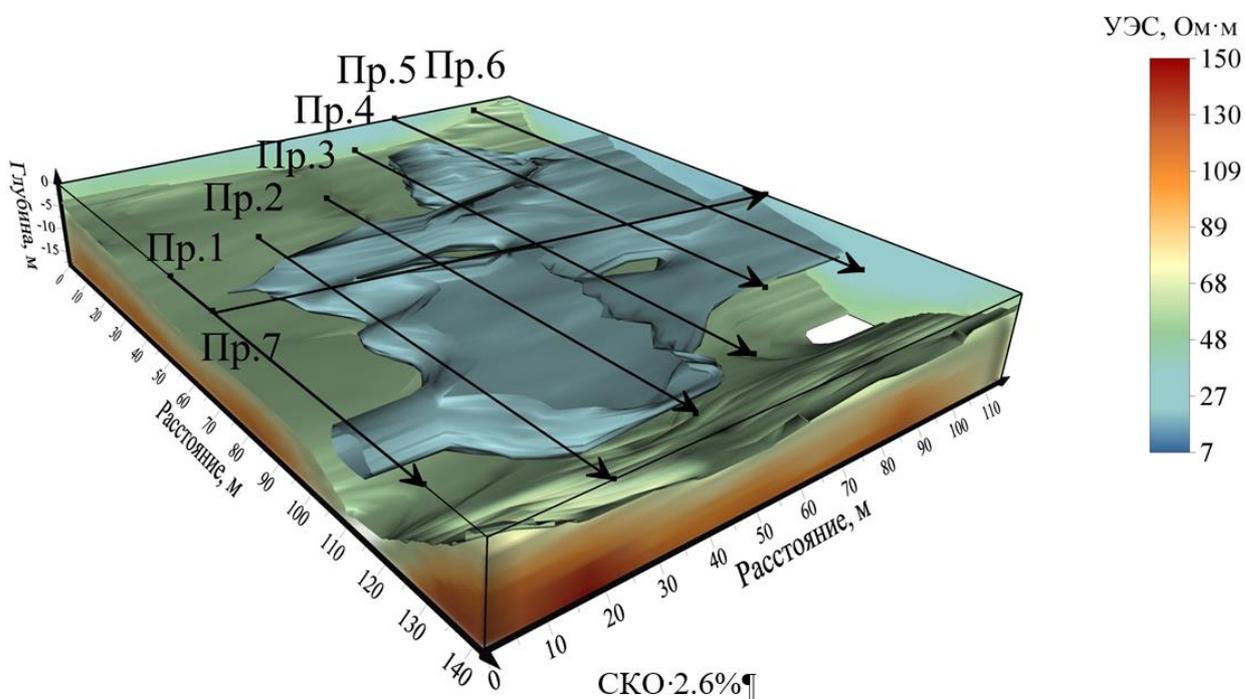


Рисунок 20 - Трехмерная модель участка хвостохранилища Талмовские пески

Построение структурных моделей и одномерная инверсия данных ЭМП

На Рисунках 21 и 22 показаны геоэлектрические разрезы по данным электротомографии.

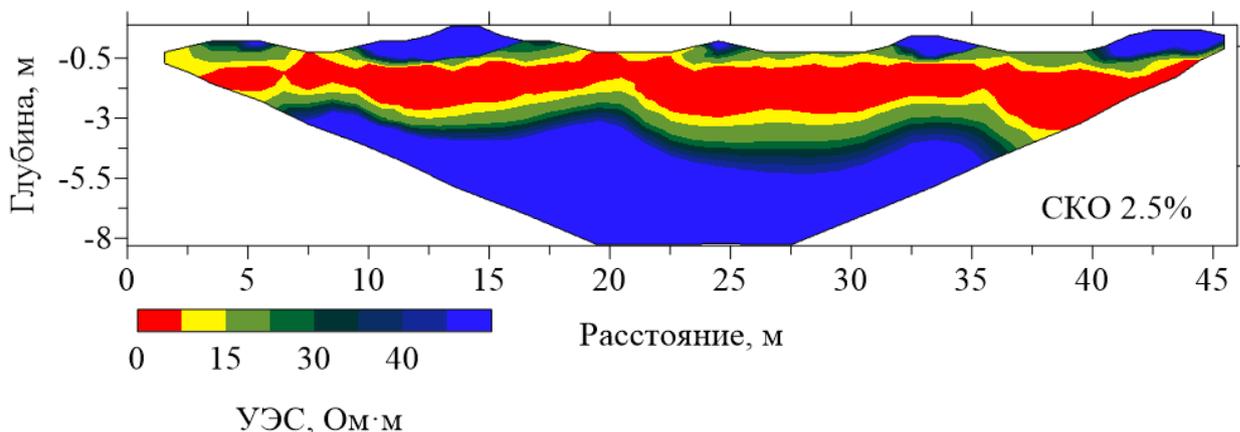


Рисунок 21 – Геоэлектрический разрез по профилю 1 на хвостохранилище Талмовские пески

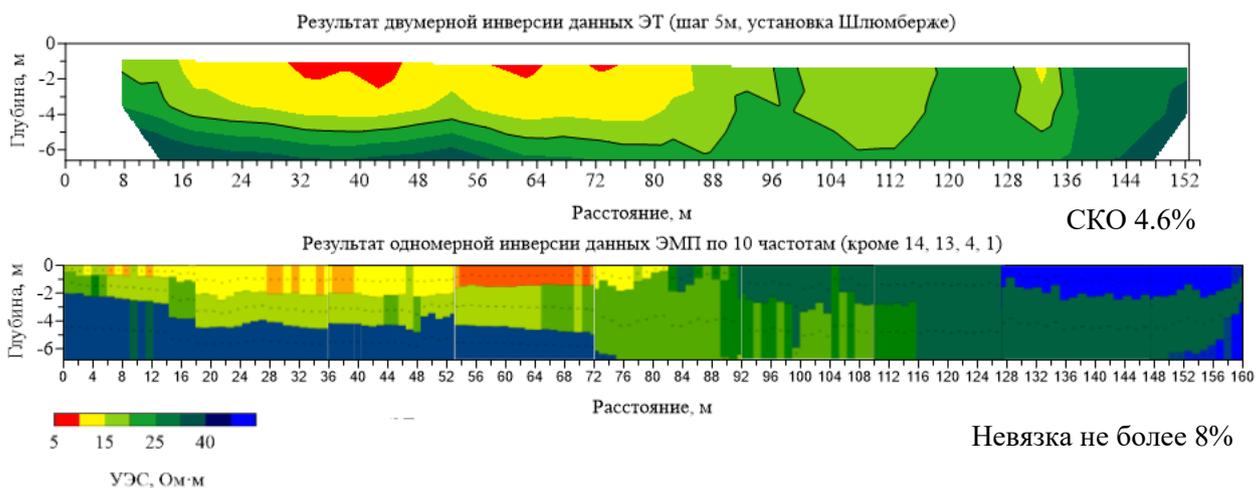


Рисунок 22 - Геоэлектрические разрезы по профилю 2. Вверху – результат двумерной инверсии данных электротомографии, внизу – результат одномерной инверсии данных ЭМП. Талмовские пески

В связи с низкими значениями УЭС отходов (до 50 Ом·м) на изучаемом объекте, уровень изменений полезного сигнала, регистрируемого аппаратурой ЭМС, на 1-2 порядка превышает собственные шумы аппаратуры на всех используемых частотах. Это в совокупности с калибровкой прибора позволяет использовать полученные данные для проведения одномерной инверсии. Для чего использовалась пробная версия разрабатываемого ПО Nemfis1D (Балков Е.В, Каминский А.Е.) На Рисунке 22 представлены результаты двумерной инверсии данных электротомографии и одномерной инверсии данных электромагнитного профилирования. Оценивая диапазоны сопротивлений и расположение проводящих аномалий, связанных с техногенными отложениями, можно сделать вывод о взаимном соответствии между двумя геоэлектрическими моделями, полученными с использованием методов ЭТ и ЭМП.

Диапазон сопротивлений пиритовых песков по данным опробования шурфов – от 3 до 12 Ом·м. Подстилающие породы представляют собой речные осадки – пески, илы и глины. Электросопротивление этих пород находится в диапазоне от 12 до 200 Ом·м. Практически на поверхности лежат островки почвенного слоя с более высоким сопротивлением чем пески, порядка 50-100 Ом·м. Высокое сопротивление обусловлено выветрелыми мелкими фракциями и низким содержанием влаги. Таким образом получаем следующую структурную интерпретацию (Рисунке 23).

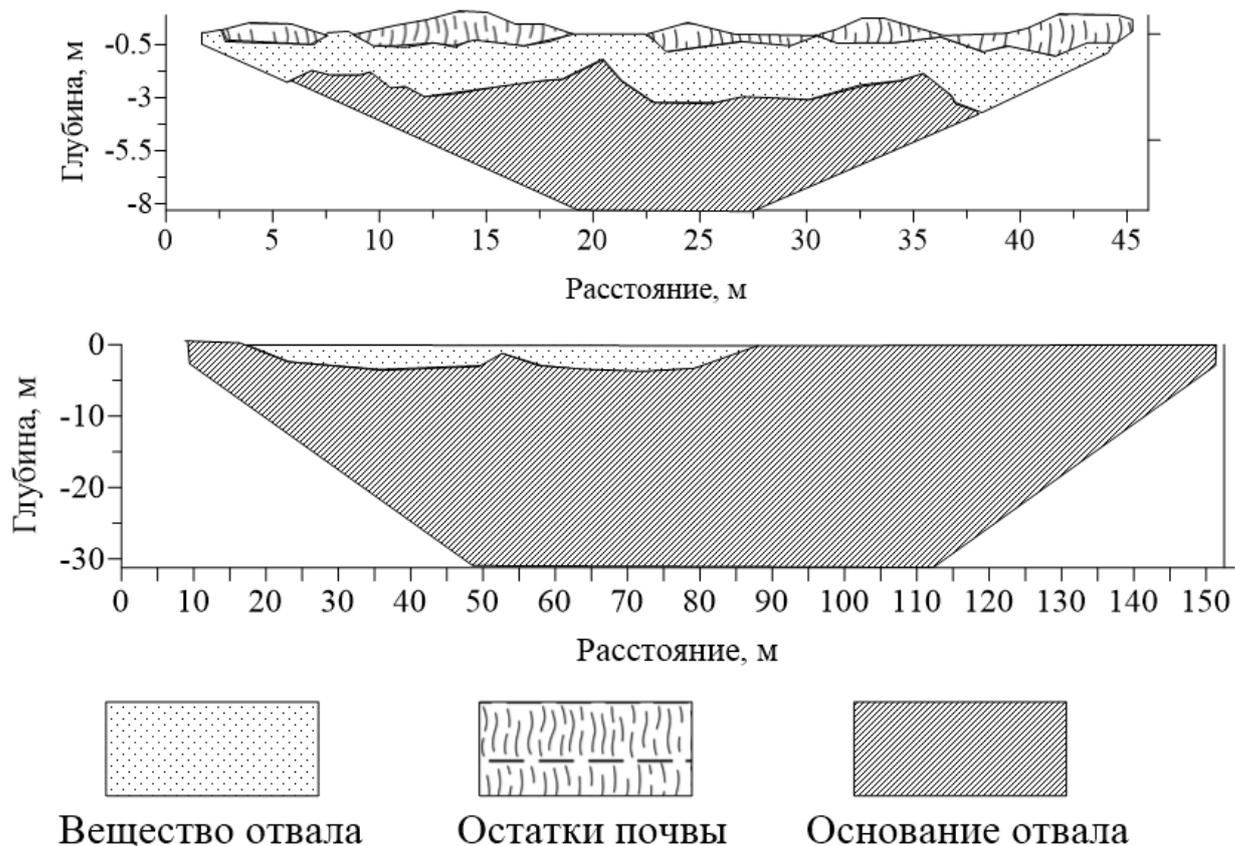


Рисунок 23 - Структурная интерпретация данных электротомографии.
Талмовские пески

Мощность песков по данным полученных моделей варьирует от 3 до 5.5 м. Построенные геоэлектрические разрезы и структурная модель могут быть использованы для оконтуривания тела отходов и оценки объемов потенциально ценных и токсичных компонентов в техногенном веществе.

Выводы

В результате проведенных исследований определен объем среды с различным диапазоном УЭС, построены модели исследуемого объекта (геоэлектрические, структурные и ЦМР). По усредненным количествам веществ на 1 м³, определенным в результате геохимического опробования шурфов, установлено содержание потенциально ценных и токсичных компонентов в отходах (Таблица 3) [Юркевич и др., 2023].

Таблица 3 - Усредненное содержание некоторых элементов в отходах хвостохранилища с УЭС до 50 Ом·м

	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

Одномерная инверсия данных ЭМП позволяет получить геоэлектрическую модель изучаемого объекта, близкую к модели по данным ЭТ. При этом скорость сбора данных у аппаратуры ЭМС выше. Завершение разработки ПО Nemfis1D или создание аналогичного продукта для инверсии данных аппаратуры ЭМС позволит в будущем отказаться или значительно сократить объемы измерений методом ЭТ при изучении отходов на глубину до 10 м.

3.3 Хвостохранилище– Дюков лог (смешанный тип)

Этот техногенный объект тесно связан с Салаирским ГОКом, и «образовался в результате складирования отходов флотации и цианирования барит-полиметаллических рудных тел в 1942 - 1975 гг. Хвостохранилище расположено в естественном логоу в черте г. Салаир (Рисунок 24). Вещества, слагающие хвостохранилище, поступали из природной зоны окисления рудных тел и поэтому отвал состоит из сильноизмененных пород и минералов [Бортникова и др., 2003; Еров et al., 2017]. Первичные рудные минералы представлены пиритом (3.5 %), галенитом и сфалеритом (по 0.5 %). Сульфиды в среднем окислены на 30 %. Среди вторичных рудных минералов преобладают гидроксиды Fe (1 %), англезит и смитсонит (по 0.3 %). Главные жильные минералы – кварц, барит и каолинит. За время существования хранилища накоплено около 1.5 млн тонн отходов. На сегодняшний день размеры хвостохранилища - 400 х 300 м², на его поверхности находятся небольшие озера, являющиеся реликтами гидроотвала, ниже дамбы по рельефу – пруд-отстойник, принимающий фильтрационные стоки с хранилища» [Эпов и др., 2017].



Рисунок 24 - Хвостохранилище Дюков Лог

Хвостохранилище Дюков Лог исследовалось методом электротомографии. Общая протяженность трех профилей 705 м, расположение профилей выбиралось так, чтобы пересечь наиболее глубокие места естественного лога. С целью определения состояния дамбы, один профиль проходил вкост плотины (Рисунок 25).

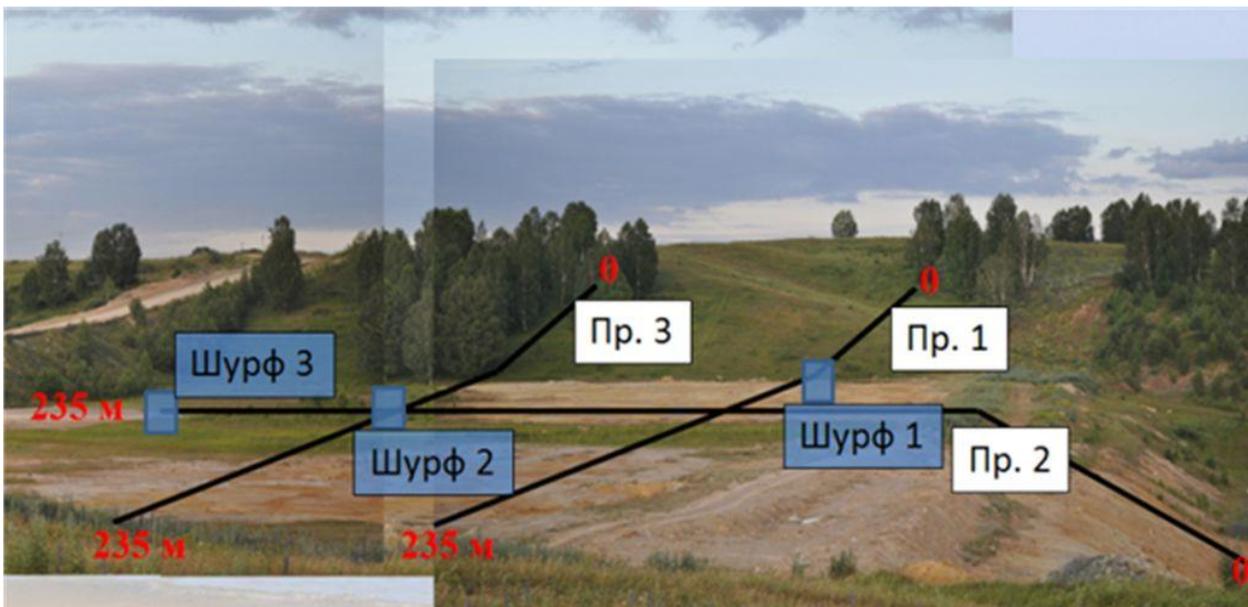


Рисунок 25 - Схема расположения профилей и шурфов на хвостохранилище Дюков Лог (Юркевич Н.В.)

На Рисунке 25 показано расположение профилей электротомографии, пересекающих тело хвостохранилища вдоль и вкост насыпной дамбы.

Дамба предотвращает распространение отходов ниже по склону в пруд отстойник. На Рисунке 26 показаны результаты инверсии в виде двумерных геоэлектрических разрезов по трем профилям. Профили 1 и 3 расположены параллельно друг другу и телу дамбы. Тело отходов характеризуется электросопротивлениями от единиц до 100 Ом·м, в зависимости от состава и влажности. Аномалии, обозначенные на разрезах оттенками синего цвета,

соответствуют областям максимальной электропроводимости и минерализации.

На Рисунке 26В показан разрез по профилю 2. Аномалия синего цвета на отметке 80 м по профилю проходит сверху над высокоомной (выше 500 Ом·м) дамбой, уходя ниже отметки 30 м по глубине. Вероятно, высокоминерализованные растворы попадают в грунтовые воды в обход пруда отстойника, нанося вред окружающей среде. В целом все разрезы показывают смещение основной массы высокоминерализованных отходов ближе к западной части хранилища. Подстилающие породы имеют значительно большее сопротивление, от 500 Ом·м. По результатам электротомографии можно констатировать, что на исследованном участке хвостохранилища не выявлено утечек дренажных растворов через границу с подстилающими породами. Только через верхнюю часть дамбы уходит некоторое количество растворенного вещества.

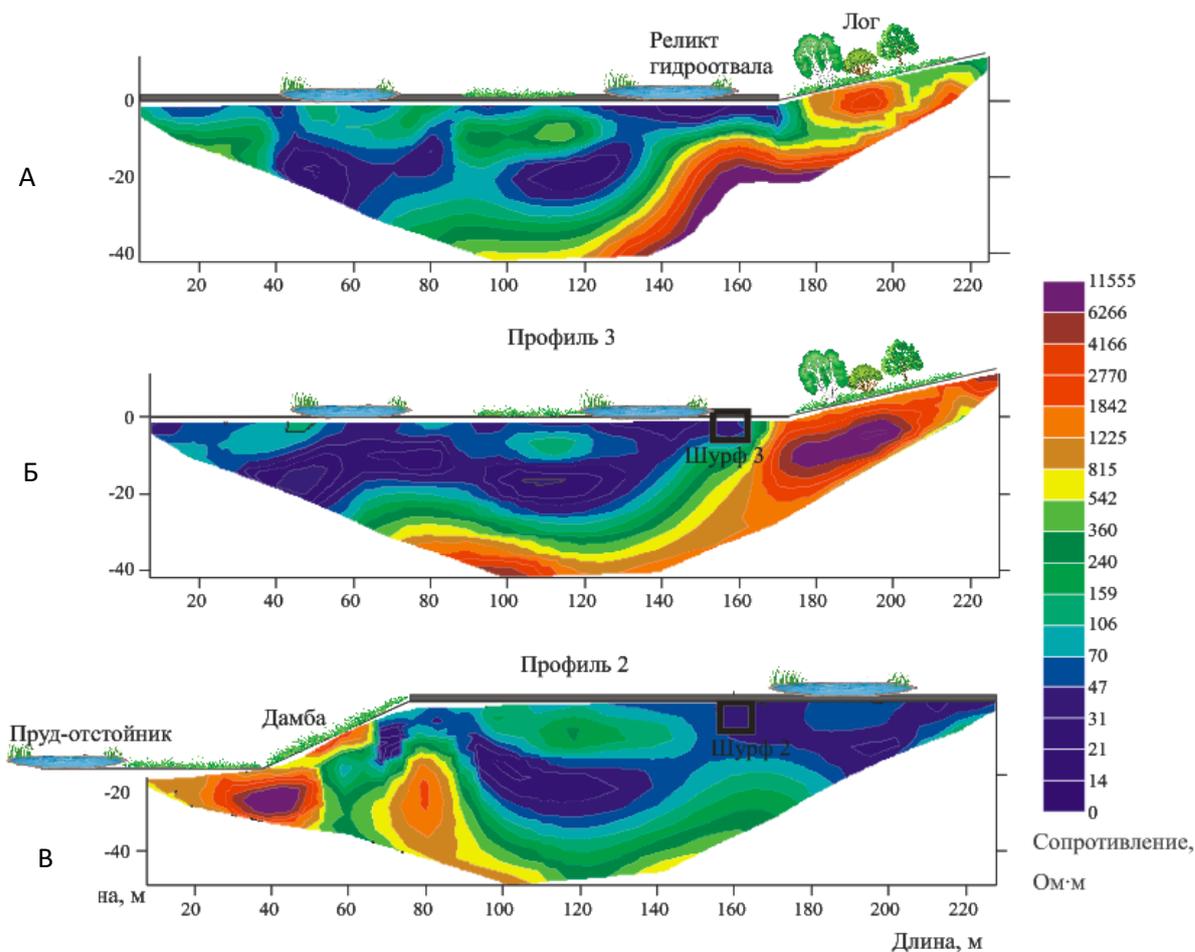


Рисунок 26 - Геоэлектрические разрезы вдоль профилей 1-3 по данным ЭТ на хвостохранилище Дюков Лог (рис. Юркевич Н.В.). СКО не более 5%

Построение структурных моделей

На Рисунок 27 показаны результаты двумерной инверсии в ПО Res2Dinv в виде двумерных разрезов по трем профилям. Профили 1 и 3 расположены параллельно друг другу и телу дамбы. Хвосты характеризуются электросопротивлениями от единиц до 100 Ом·м в зависимости от состава и влажности. Аномалии, обозначенные на разрезах оттенками синего цвета, соответствуют областям максимальной проводимости и минерализации.

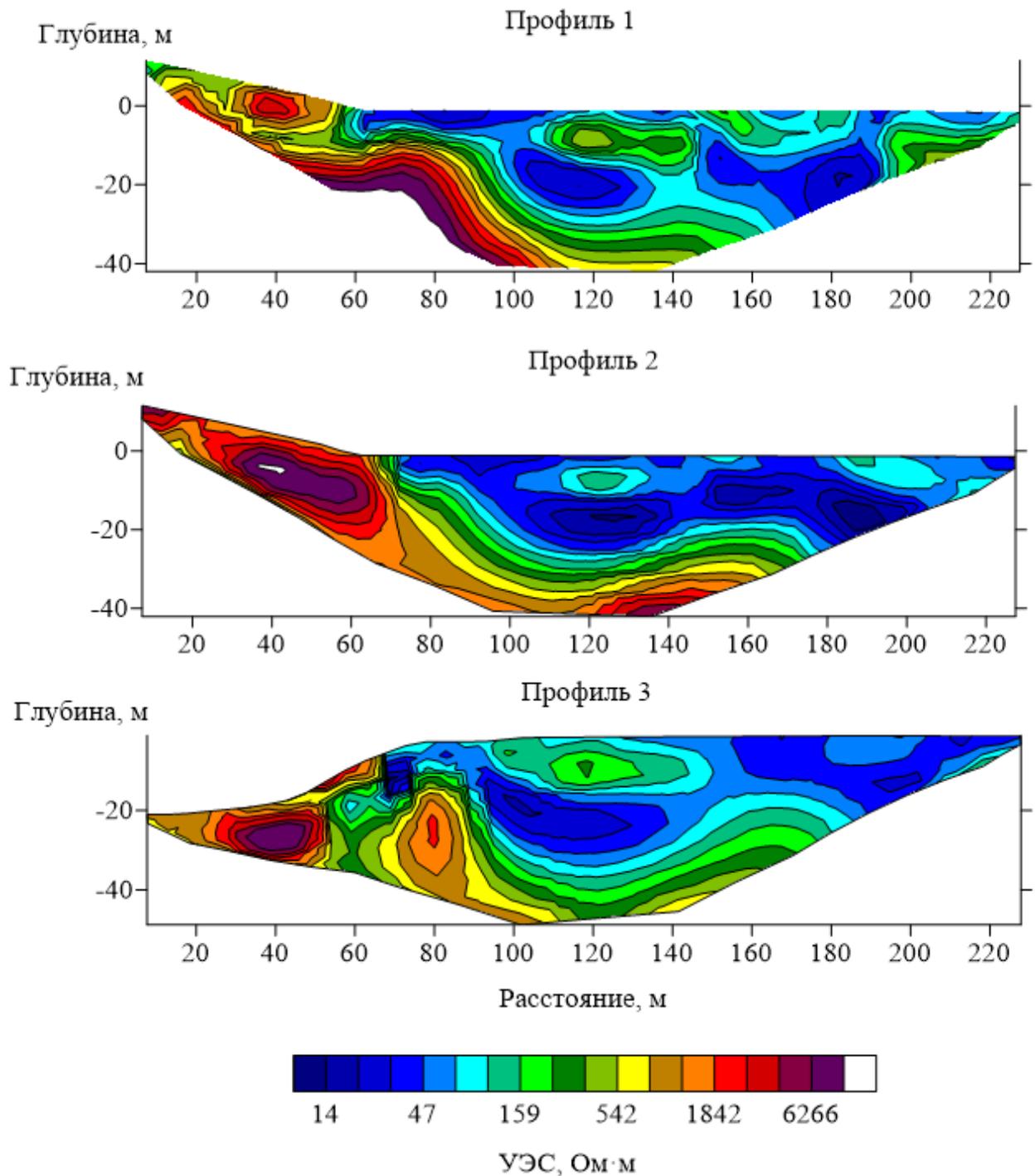


Рисунок 27 - Геоэлектрические разрезы вдоль профилей 1-3 по данным ЭТ на хвостохранилище Дюков Лог [Эпов и др., 2017]. СКО не более 5%

На Рисунок 28 показана структурная интерпретация вдоль исследованных профилей. Граница между отложениями и подстилающими породами была проведена по изолинии 542 Ом·м. Также был выделен путь миграции дренажных растворов через дамбу (обозначен красными

диагональными линиями). Максимальная мощность слоя отходов составляет более 30 м.

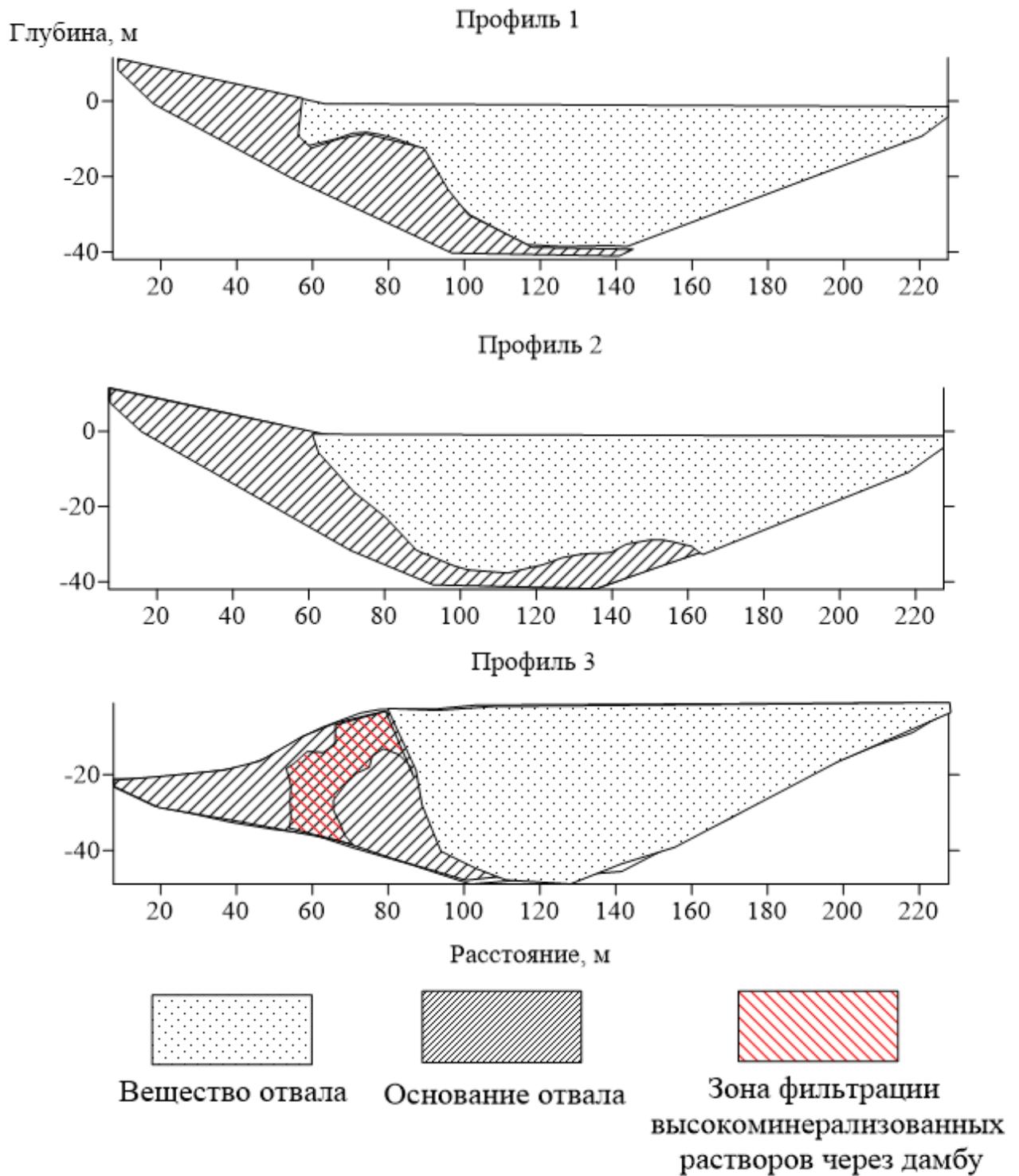


Рисунок 28 - Структурная интерпретация геофизических разрезов, хвостохранилище Дюков Лог

В результате геохимического опробования шурфов и поверхности отвала установлена «обратная корреляция между УЭС паст и суммарной концентрацией металлов в веществе отходов, что отражено в распределении этих параметров по глубине шурфа. Кроме того, значения УЭС паст обратно коррелируют с содержанием сульфатной серы в твердом веществе и суммарными концентрациями металлов (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cd, Pb) и цинка в водных вытяжках. Это свидетельствует о приуроченности зон с низкими значениями УЭС к горизонтам интенсивного окисления сульфидного вещества с образованием вторичных сульфатных минералов. Результаты геохимического анализа вертикальных шурфов до глубины 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низких УЭС на геоэлектрических разрезах к обводненным горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы» [Эпов и др., 2017].

Выводы

Полученные в процессе исследования хвостохранилища Дюков Лог результаты были использованы для разработки методики, «позволяющей, с одной стороны, подсчитать количества ценных компонентов в хвостах и с другой стороны, оценить экологическую опасность хранилища при подтоплении сезонными потоками и грунтовыми водами. Это стало возможным благодаря определению геоэлектрических свойств и мощности отходов в хвостохранилище, определению корреляционных связей между УЭС и химическим (элементным) составом твердого вещества и растворов. Комплексное применение электротомографии и результатов геохимического опробования позволяют оценить изменение состава твердого вещества и водных вытяжек на глубину» [Эпов и др., 2017].

3.4 Комсомольский гидроотвал

Особенность формирования гидроотвала заключается в том, что «хвостохранилище представляет собой котловину, заполняющуюся общим стоком золотоизвлекательного завода (Рисунок 29). Объем отходов по априорной информации составляет порядка 1 млн. м³. Часть отходов состоит из кварца, полевого шпата, кальцита и сульфидных минералов (пирит, сфалерит, галенит, пирротин и арсенопирит)» [Бортникова и др., 2006]. «В результате складирования отходов над поверхностью твердой части образовалось техногенное озеро площадью 100 тыс. м², со средней глубиной около 2 м. Оно пополнялось за счет поступления обеззолоченных растворов, жидкой фазы репульпированного кека и природных стоков. В твердом веществе хвостохранилища содержится 0.1n % As, Sb, Zn, Cu и n % Fe. Дренаж хвостохранилища нейтрализуется химическим способом (добавлением железного купороса) от цианидов, металлов и мышьяка, далее сток сбрасывается в р. Воскресенка» [Бортникова и др., 2006; Юркевич и др., 2017; Yurkevich et al., 2017].



Рисунок 29 - Комсомольский гидроотвал

На Комсомольском гидроотвале площадные наблюдения методом ЭМП были проведены для выделения областей пониженного УЭС среды с последующей детализацией методом ЭТ. Всего были исследованы методом ЭМП две площадки общей площадью 2000 м². И вдоль 5 профилей проведены измерения методом ЭТ. Шаг сетки площадных наблюдений составил 2 м. Шаг между электродами вдоль профилей – 0.3 м. Для отбора проб в областях с минимальными и максимальными значениями УЭС выкапывались шурфы (схема расположения шурфов на Рисунке 30) на глубину до двух метров.

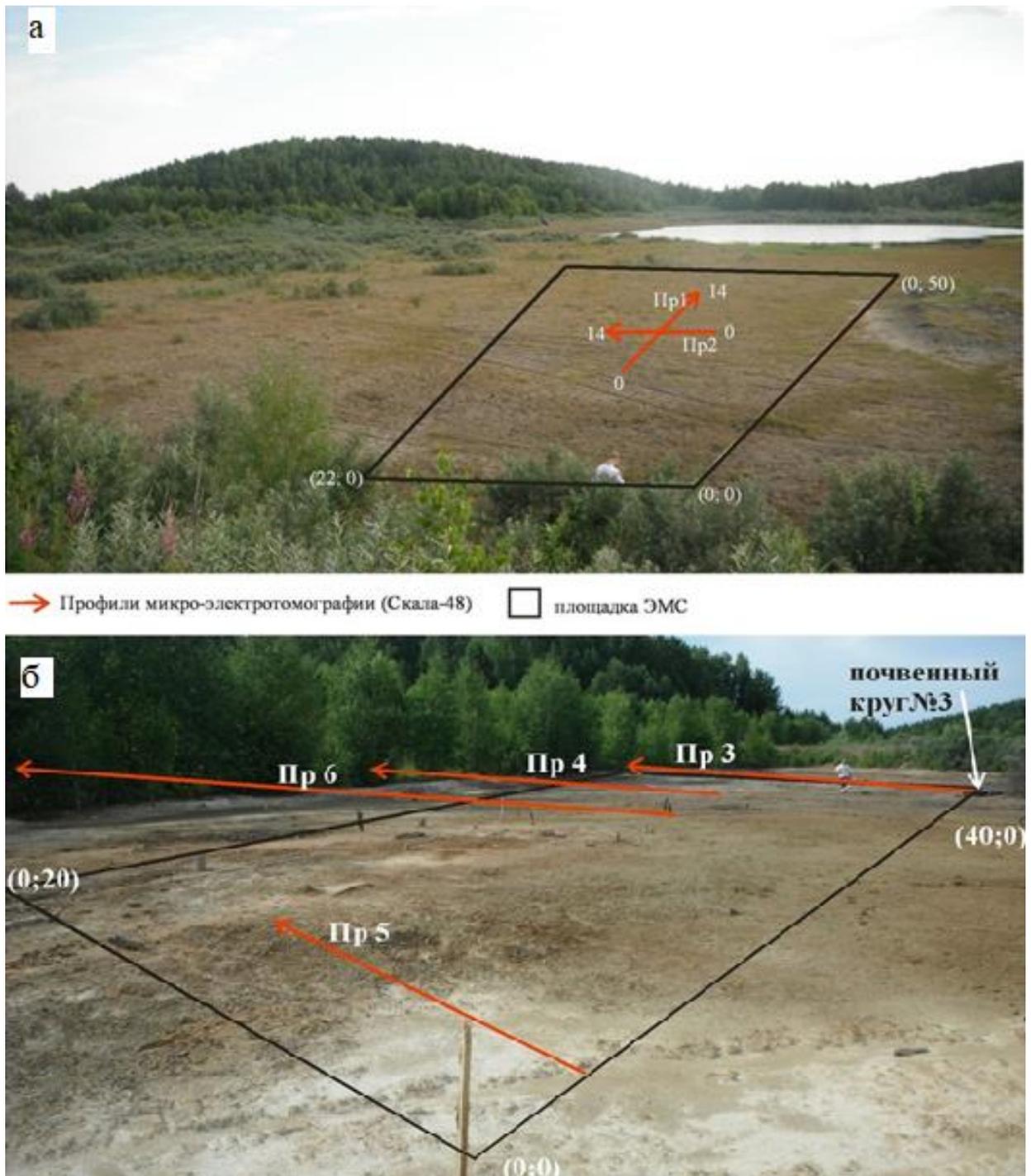


Рисунок 30 - Система наблюдений на Комсомольском гидроотвале: Северная часть, площадка 1 (А), Южная часть, площадка 2 (Б)

Исследования на предыдущих объектах показали, что для экспресс-диагностики геоэлектрической зональности в латеральном плане на первом этапе целесообразно использовать бесконтактный метод ЭМП на всей

территории или отдельной перспективной части. Затем в зонах с наименьшими значениями УЭС необходимо проводить детальные исследования методом ЭТ.

В качестве перспективных площадок для исследования на Комсосольском хвостохранилище были выбраны северная и южная части размерами 50 x 20 м² и 40 x 20 м², соответственно. Вещество отходов в северной части менее окислено, визуальное более однородно, чем в южной, подвергшейся сильному гипергенному преобразованию.

На Рисунке 31 показана карта распределения УЭС по данным ЭМП на северной площадке. Диапазон относительно низких сопротивлений не превышает 2 Ом·м. Однако можно видеть, что северная часть исследуемой площади имеет меньшее электросопротивление чем, южная.

Для детализации исследований методом ЭТ профили были расположены в переходной зоне, где УЭС составляет 6.7 - 7 Ом·м. На Рисунках 32-33 показаны разрезы по профилям 1 и 2, выполненные методом ЭТ. Верхняя часть разреза по профилю 1 практически однородна и имеет сопротивление порядка 10-14 Ом·м. Вероятно, с глубины 1.5 м рост электрического сопротивления связан с приближением к поверхности котлована, на которую были складированы отходы.

Разрез по профилю 2 (Рисунок 32) имеет менее однородную структуру в сравнении с профилем 1, низкоомные (ниже 10 Ом·м) аномалии на отметках с 3.5 до 5.2 м и в интервале с 9.5 по 12 м были выбраны как наиболее перспективные для изучения шурфами. Также аномалия в центре профиля вызвала интерес повышением сопротивления до 16 Ом·м.

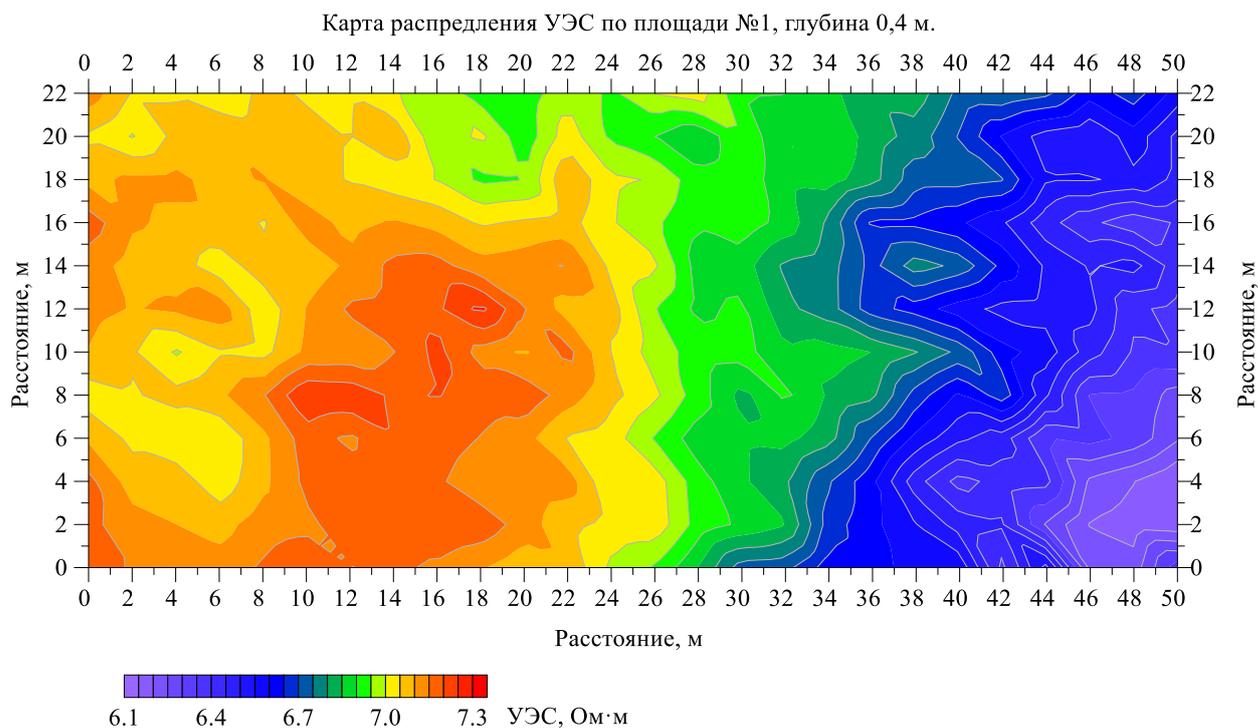


Рисунок 31 - Карта распределения УЭС на северной площадке Комсомольского хвостохранилища по данным ЭМП

Подобная картина может быть связана с неоднозначностью при решении обратной задачи в программе двумерной инверсии. Исследование шурфов позволит скорректировать стартовую модель в случае, если аномалии окажутся артефактами инверсии.

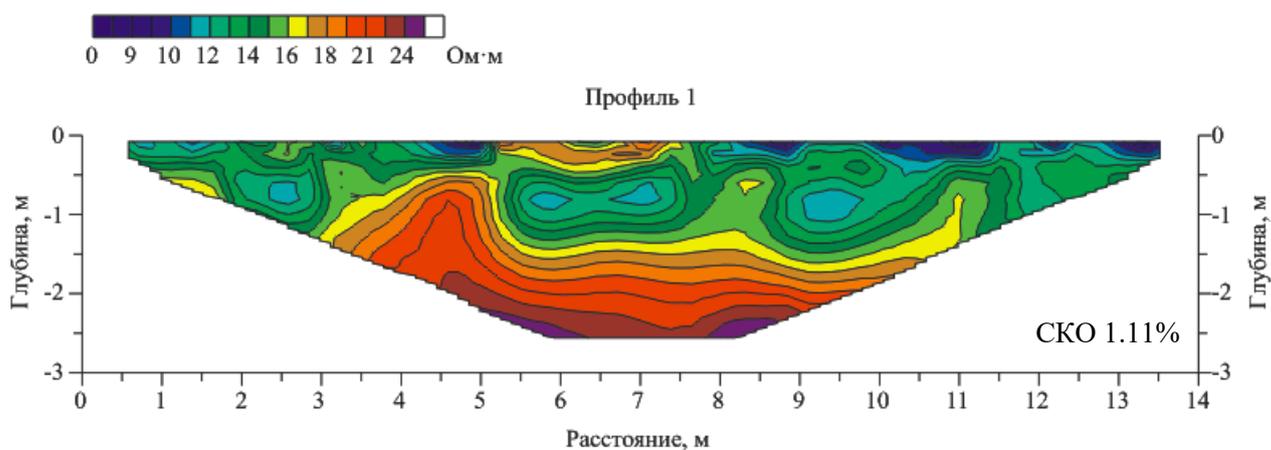


Рисунок 32 - Разрез ЭТ на северной площадке Комсомольского хвостохранилища

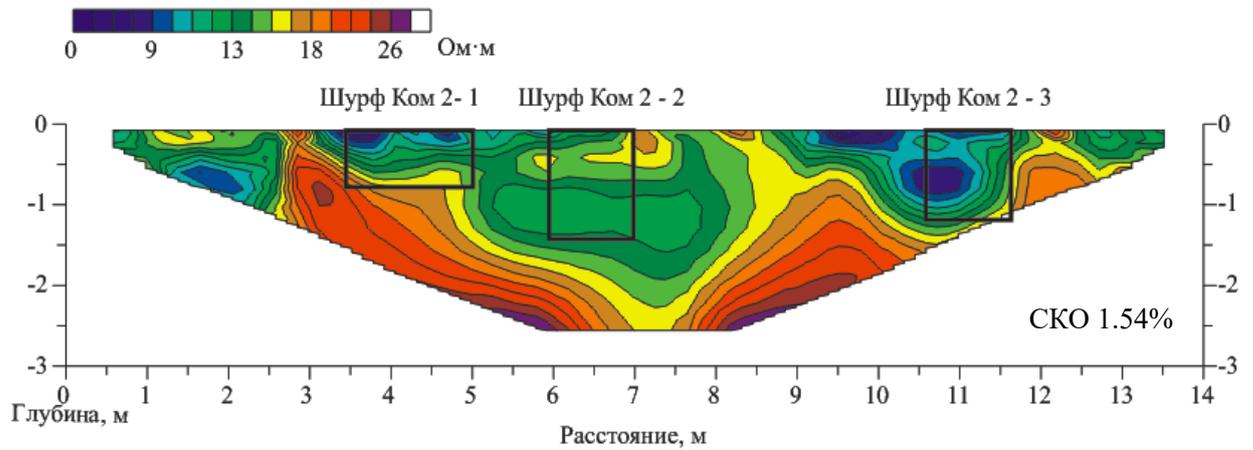


Рисунок 33 - Разрез по профилю 2 ЭТ на северной площадке Комсомольского хвостохранилища

Южная площадка также была оперативно исследована сначала бесконтактным методом ЭМП, выделены области для последующей детализации. На Рисунке 34 показана карта распределения УЭС по данным ЭМП для южной площадки, общий диапазон УЭС здесь гораздо шире, чем в северной части, от 15 до 140 Ом·м. Как в случае с северной площадкой, на южной также видно снижение УЭС в северном направлении. Однако поверхностный смыв глин с бортов оконтуривающей плотины увеличивает электросопротивление в юго-западной части.

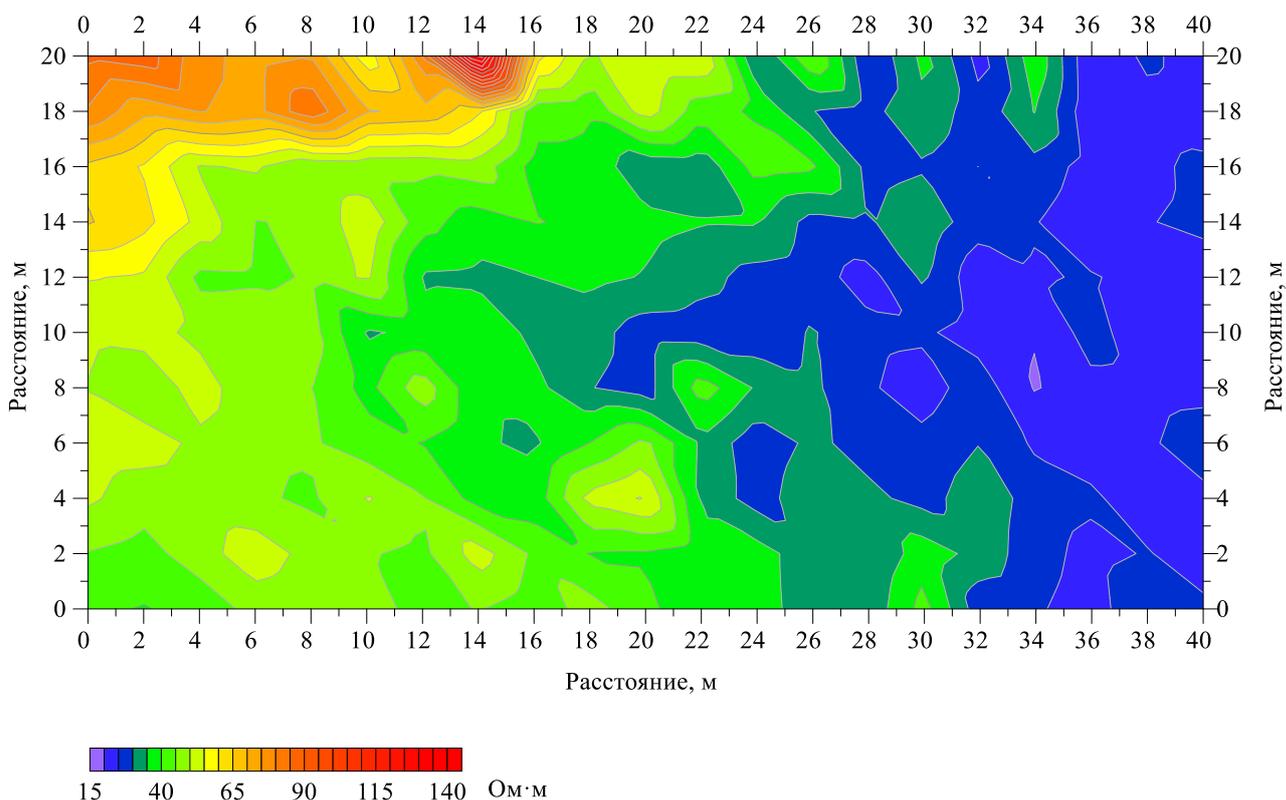


Рисунок 34 - Карта распределения УЭС по данным ЭМП на южной площадке Комсомольского хвостохранилища

Для детализации исследований методом ЭТ были выполнены измерения по 4 профилям. Профили 4 (Рисунок 38) и 6 (Рисунок 37) - с заходом на дамбу, для оценки целостности гидротехнического сооружения. Профили 3 и 5 проложены в местах, наиболее интересных для изучения и сравнения.

Разрез по профилю 3 представлен на Рисунке 35. Сопротивление варьирует в диапазоне от единиц до 90 Ом·м. Слой с УЭС до 4 Ом·м расположен до глубины 1.5 м. До глубины 2.5 м УЭС отходов не выше 12 Ом·м, глубже УЭС превышает 60 Ом·м. На 10 и 17 м по профилю расположены зоны с сопротивлением до 4 Ом·м (глубина 1 и 1,5 м соответственно).

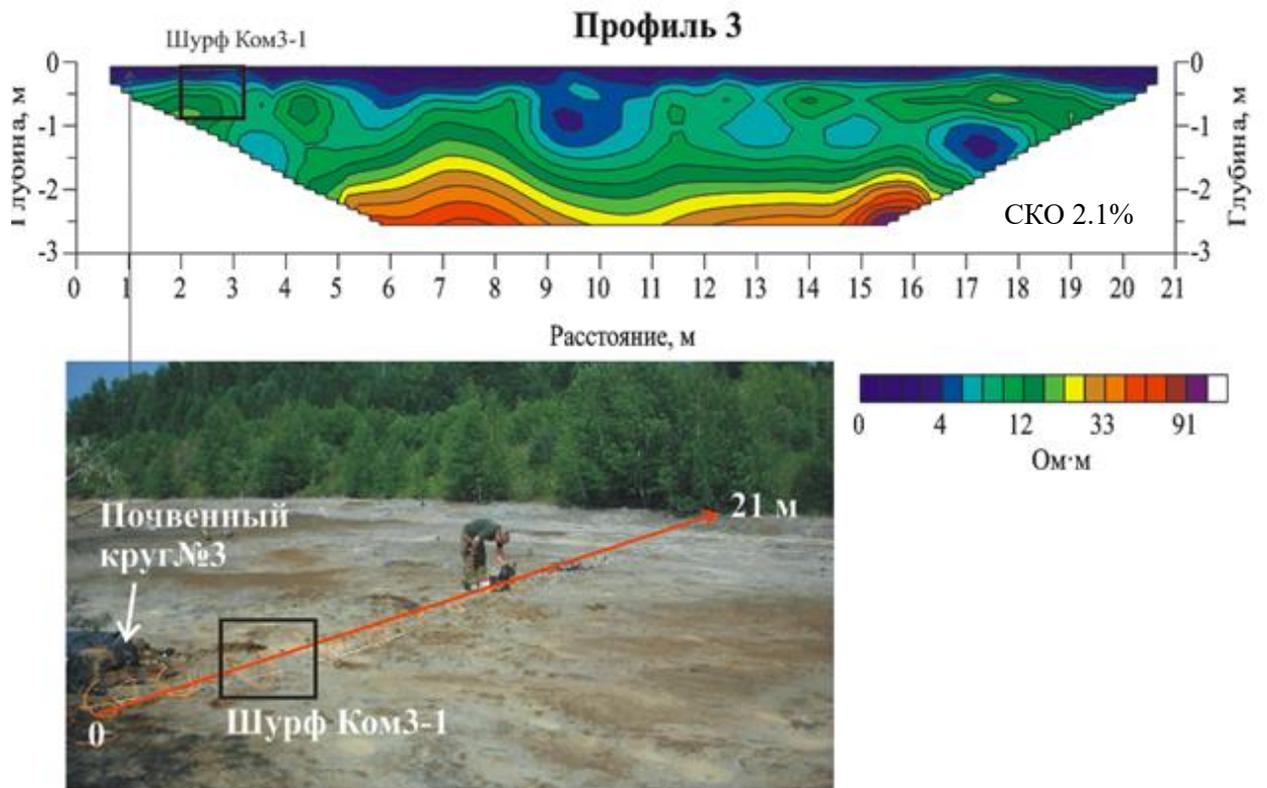


Рисунок 35 - Разрез ЭТ на южной площадке Комсомольского хвостохранилища

На Рисунке 36 показан разрез по профилю 5. Диапазон сопротивлений немного выше, чем на профиле 3. В верхней части разреза до глубины 1 м прослеживается слой с сопротивлением от 30 до 50 Ом·м, под ним расположен низкоомный (до 14 Ом·м) пласт, мощностью не более метра. Мощность отходов в этой части также не превышает 2 м и на глубине 2-2.1 м можно наблюдать повышение УЭС.

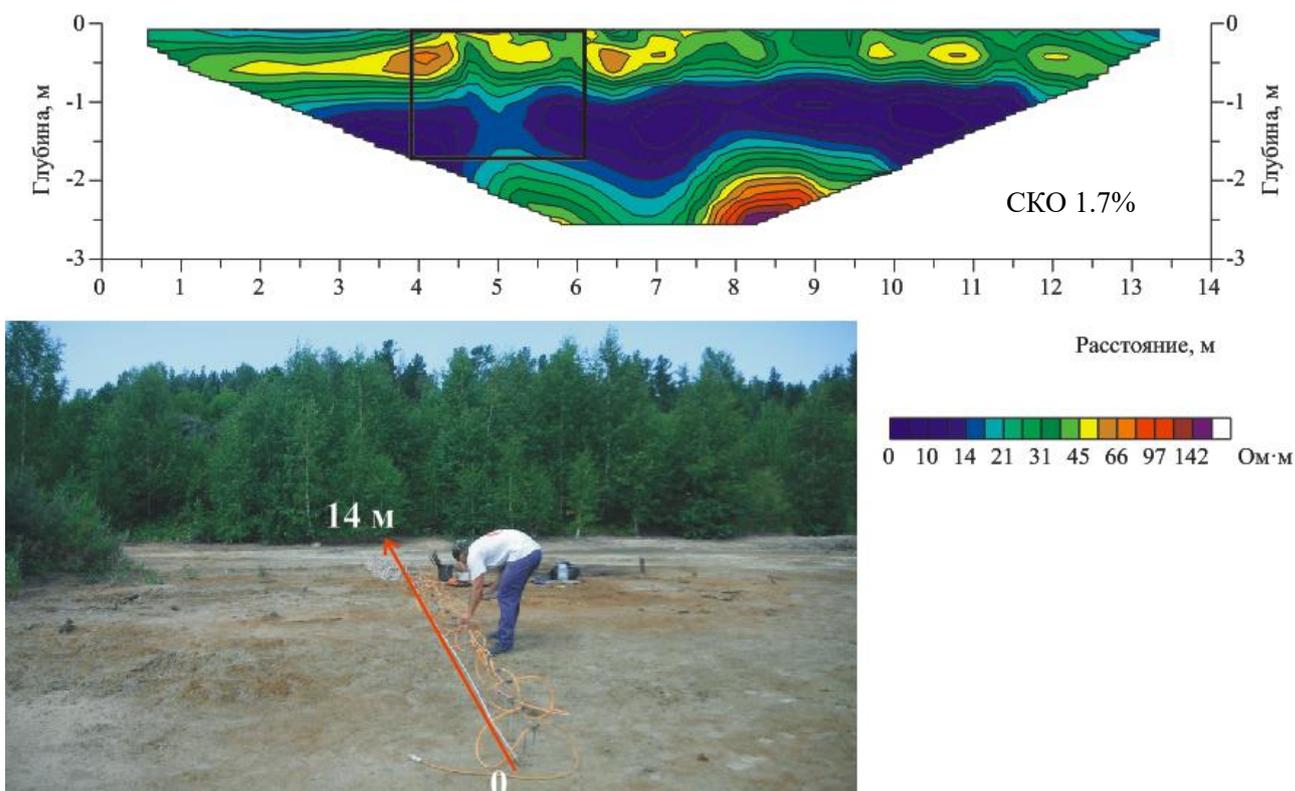


Рисунок 36 - Разрез по профилю 5 ЭТ на южной площадке Комсомольского хвостохранилища

На Рисунках 37-38 показаны разрезы по профилям 6 и 4 соответственно, основное назначение этих исследований - определить общую мощность отложений и оценить вероятность утечки высокоминерализованных отходов вниз под гидроизолирующий слой или через дамбу. На разрезах видно, что проводящий слой с сопротивлением до 15 Ом·м в среднем имеет мощность около 2 м. Увеличение УЭС ниже этого слоя и под дамбой указывают на то, что утечка дренажных растворов на исследуемой площадке не происходит. Тело дамбы имеет значительно большее электрическое сопротивление, чем коренные породы, подстилающие отходы, значения УЭС могут достигать 1500 Ом·м. Но в верхней части дамбы (Рисунок 37) имеется аномалия пониженных УЭС (70 Ом·м), которая, вероятно, связана с глинистой «шапкой» верхней части дамбы.

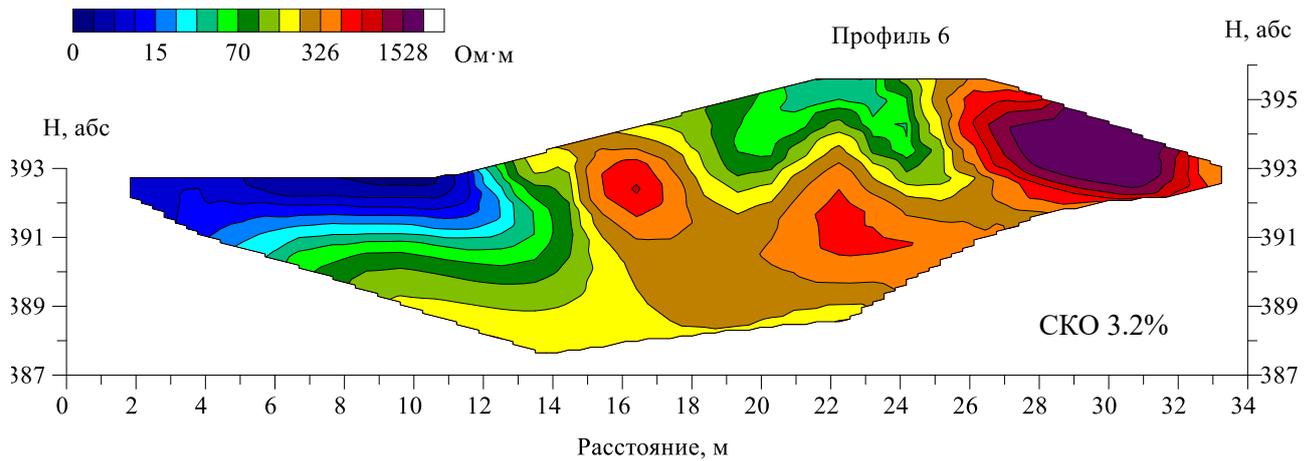


Рисунок 37 - Разрез по профилю 6 на южной площадке Комсомольского хвостохранилища

Поскольку отходы имеют значительно меньшее электрическое сопротивление (1-15 Ом·м), чем подстилающие породы (> 30 Ом·м), определить положение границы хвосты/вмещающая среда возможно по изолиниям 15 Ом·м на геоэлектрических разрезах по данным ЭТ. А также практически однозначно можно выделить пути миграции низкоомных растворов через тело гидротехнических сооружений или дренаж через водоупорный горизонт, если таковой имеется. Оконтуривание хвостохранилища возможно производить с помощью метода ЭМП, а детальное расчленение разреза по вертикали и латерали методом электротомографии.

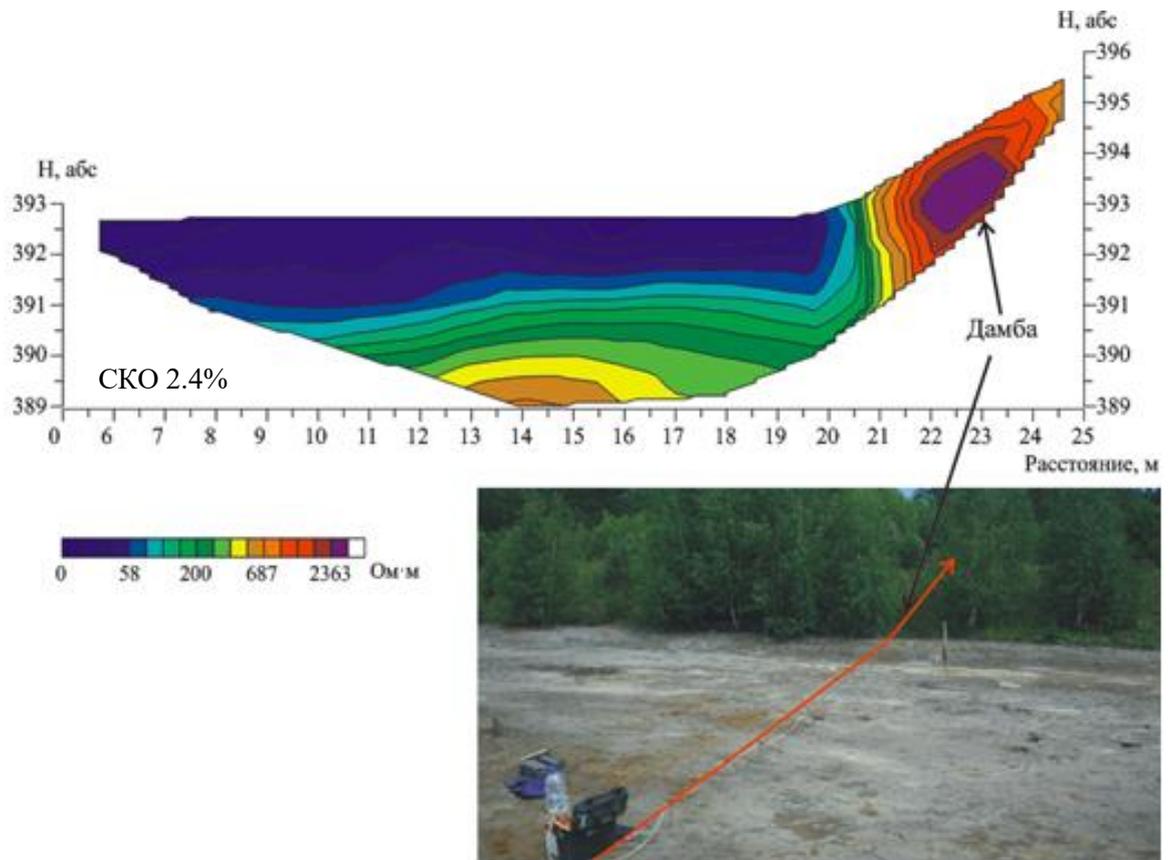


Рисунок 38 - Разрез по профилю 4 на южной площадке Комсомольского хвостохранилища

Подход к обработке данных электротомографии на примере результатов исследования хвостохранилища Комсомольский гидроотвал

Автоматическая двумерная инверсия не всегда позволяет получить геоэлектрическую модель, согласующуюся с данными бурения или шурфовки. На объекте Комсомольское хвостохранилище результат двумерной инверсии плохо согласуется с данными опробования шурфа. Электросопротивления в местах пробных шурфов значительно отличаются и не совпадают с визуально однообразными отходами, и геохимическое исследование не показало значительных различий в шурфах.

Когда результат автоматической инверсии неудовлетворителен, но требуется двумерное или же трехмерное представление изучаемой среды, можно прибегнуть к инверсии с ограничениями - учесть при двумерной инверсии определенные границы, полученные из априорной информации [Карин и др., 2017].

Для корректного построения модели хвостохранилища потребуются данные электротомографии и дифференцирование разреза хвостохранилища по слоям на основе геохимических исследований. В частности - разделение толщи отходов на горизонты с различным химическим составом и определение диапазона УЭС для каждого слоя. Согласно данным резистивиметрии (Рисунок 39) можно выделить три основных типа грунтов: дёрн, отходы («пиритные пески») и глины. Сопротивление для глин по данным Miller 400D варьирует в диапазоне от 6 до 10 Ом·м, для отходов 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 опробования шурфов.

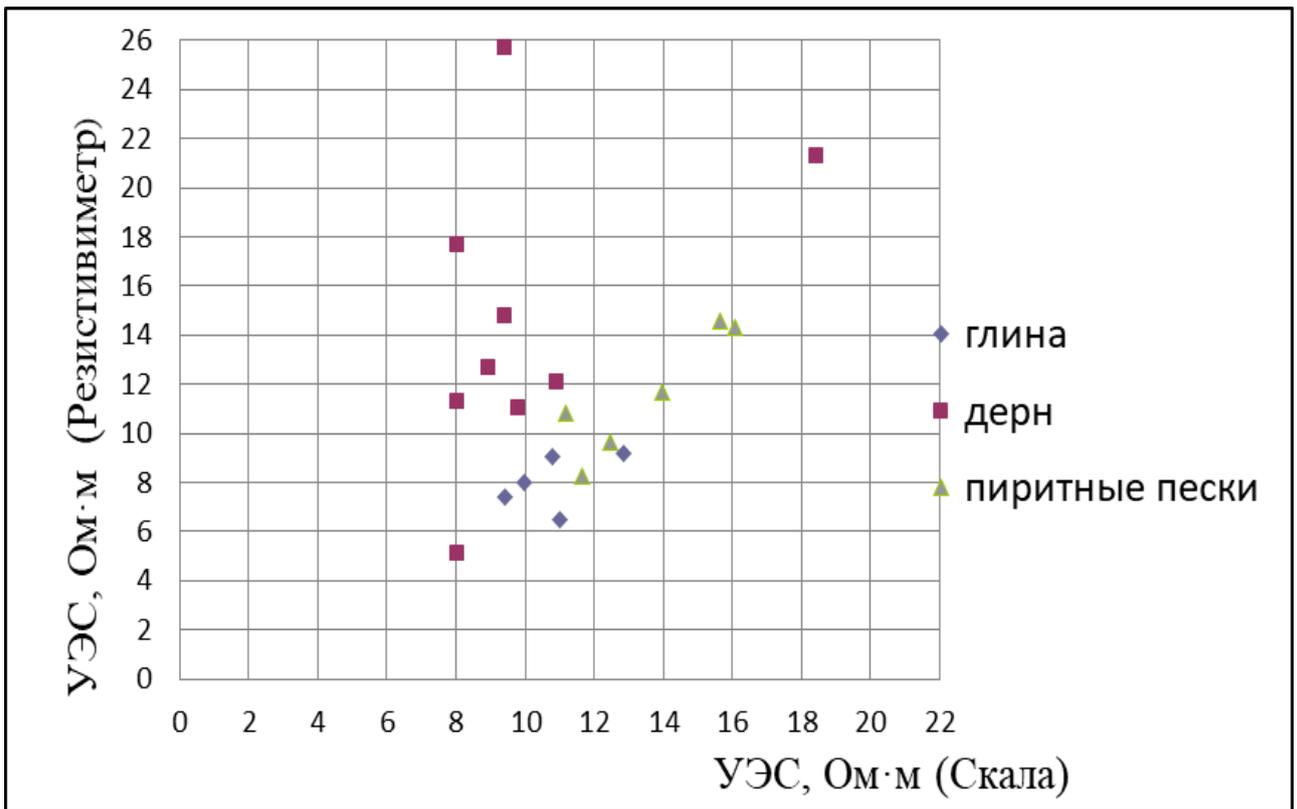


Рисунок 39 - Электросопротивление отходов в шурфе 2 по данным Скала 48 и Miller 400D

В итоге можно построить стартовую модель для одномерной инверсии данных электротомографии (Рисунок 40).

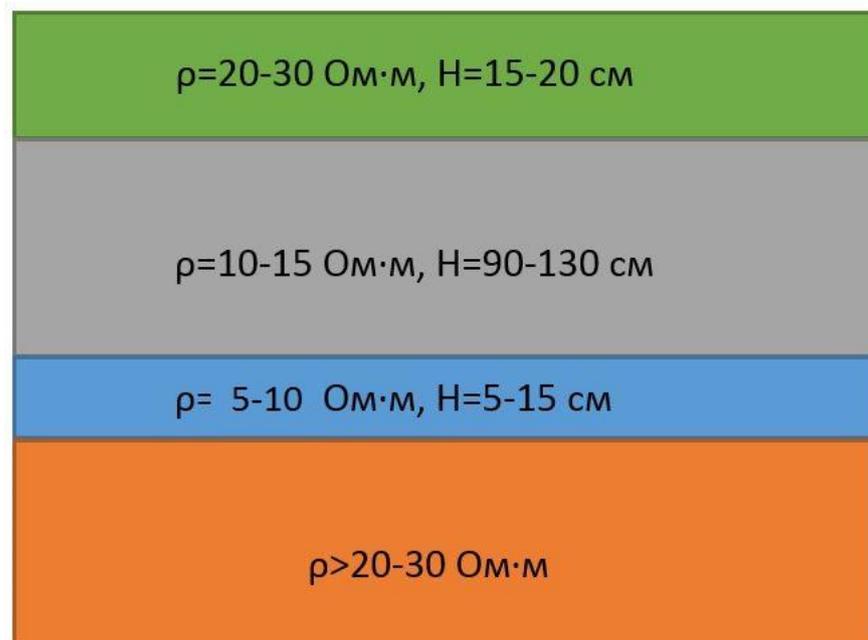


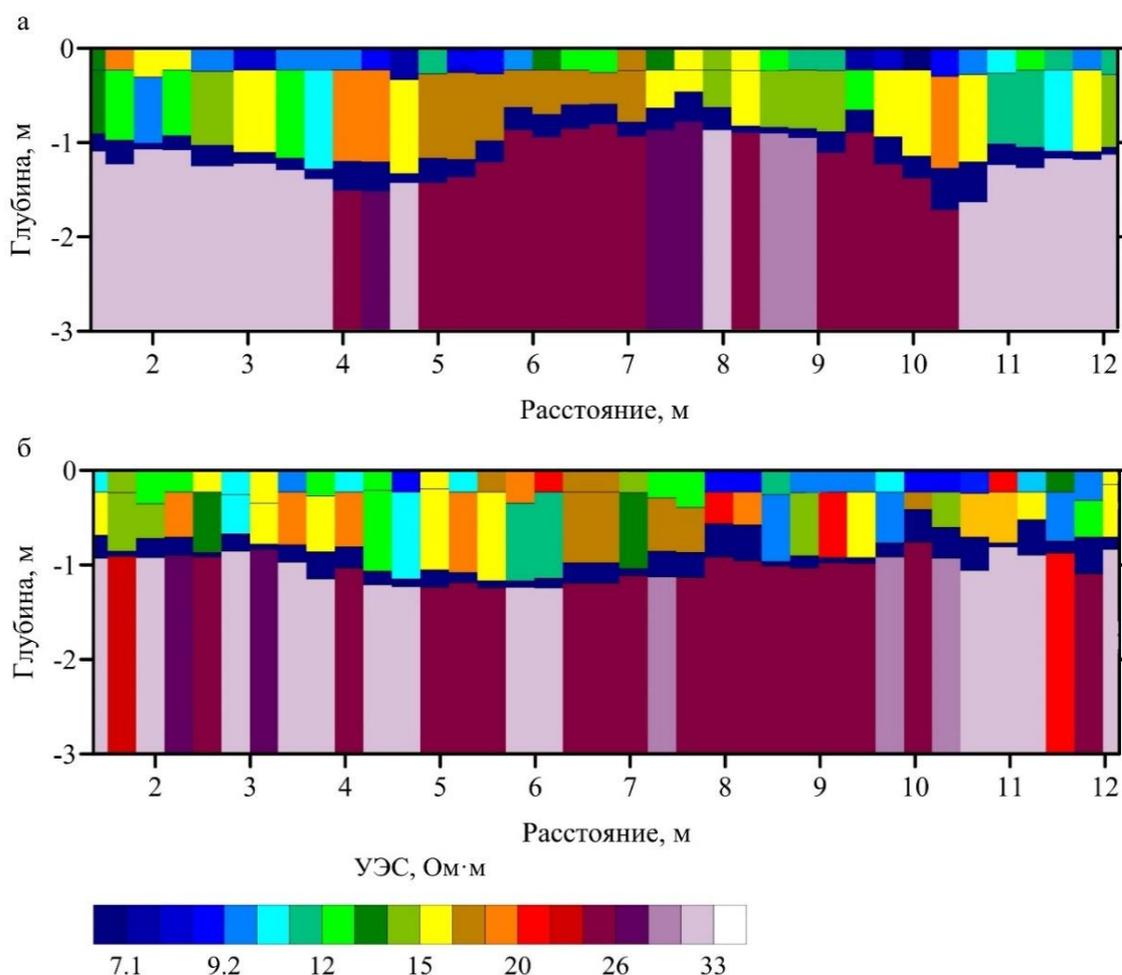
Рисунок 40 - Стартовая модель

Инверсия данных электротомографии проводится в два этапа:

- 1) Построение одномерных моделей с учетом стартовой модели (фиксируется сопротивление слоя 3 на уровне 5 Ом·м).
- 2) Двумерная инверсия данных ЭТ в заданных пределах с учетом границ, полученных в результате 1D инверсии.

Таким образом, ограничение границ слоев в программе двумерной инверсии позволяет получить двумерную геоэлектрическую модель, приближенную к стартовой модели.

На Рисунке 41 показан результат одномерной инверсии по профилям 1 и 2 на первой площадке.



Рисунке 41 - Результат одномерной инверсии данных по профилям 1 и 2. Комсомольское хвостохранилище. СКО менее 5 %

Одномерные модели строились с ограничением сопротивления слоя глин (5 Ом·м). Мощности слоев и сопротивления других горизонтов определялись в автоматическом режиме. На построенных таким образом геоэлектрических разрезах «черными линиями показаны границы, полученные в результате одномерной инверсии (Рисунок 42). Получившиеся 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, для глин – до 10 Ом·м. Мощности слоев близки к таковым по данным шурфовки» [Карин, Юркевич, 2021].

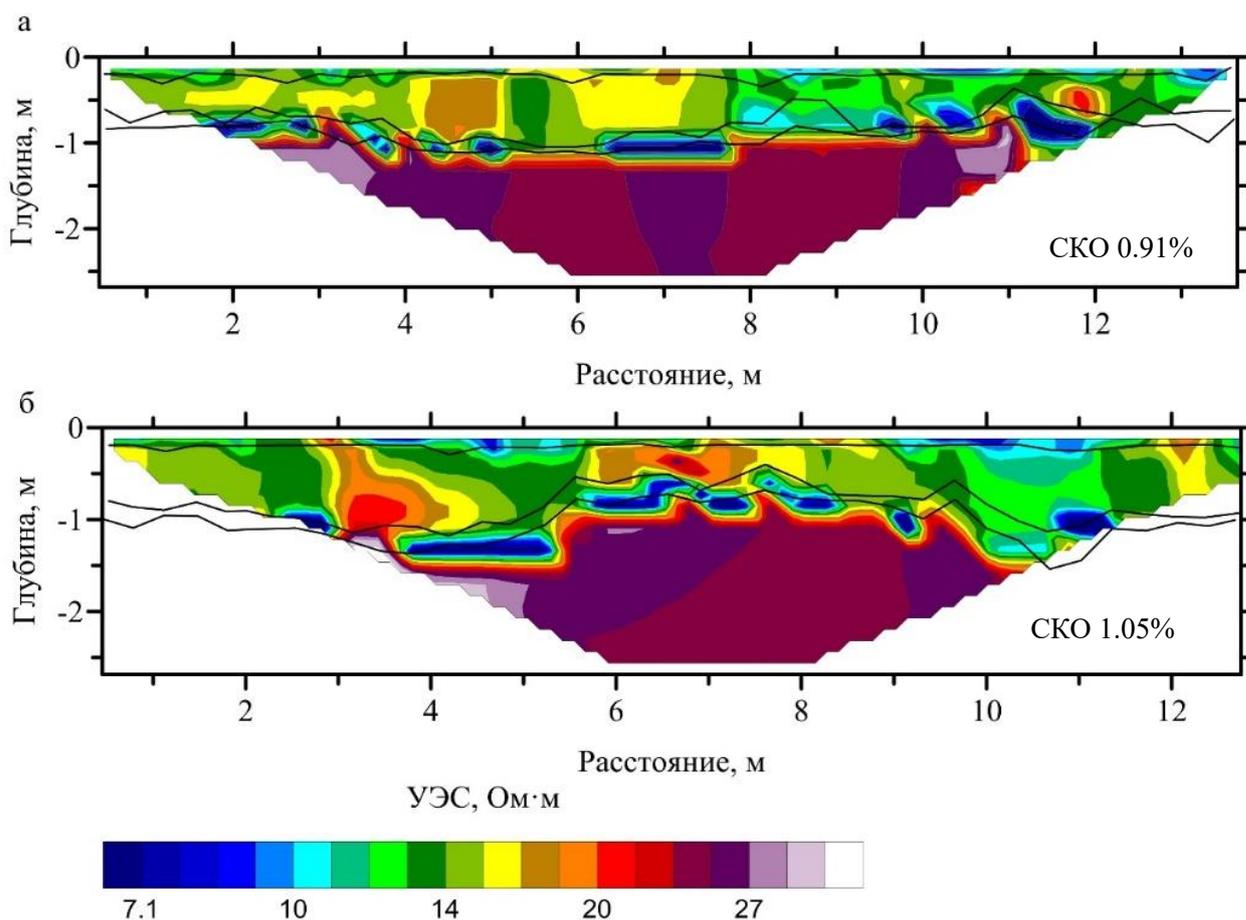


Рисунок 42 - «Геоэлектрические модели, построенные с учетом границ, полученных с помощью одномерной инверсии (черные линии): а – профиль 1 (ошибка подбора 0.91 %), б – профиль 2 (ошибка подбора 0.84 %)» [Карин, Юркевич, 2021]

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

На Рисунке 43 показаны результаты интерпретации полученных геоэлектрических моделей, по которым возможно определить мощности слоев и оценить, зная среднюю концентрацию интересующих веществ, количество потенциально ценных и токсичных компонентов.

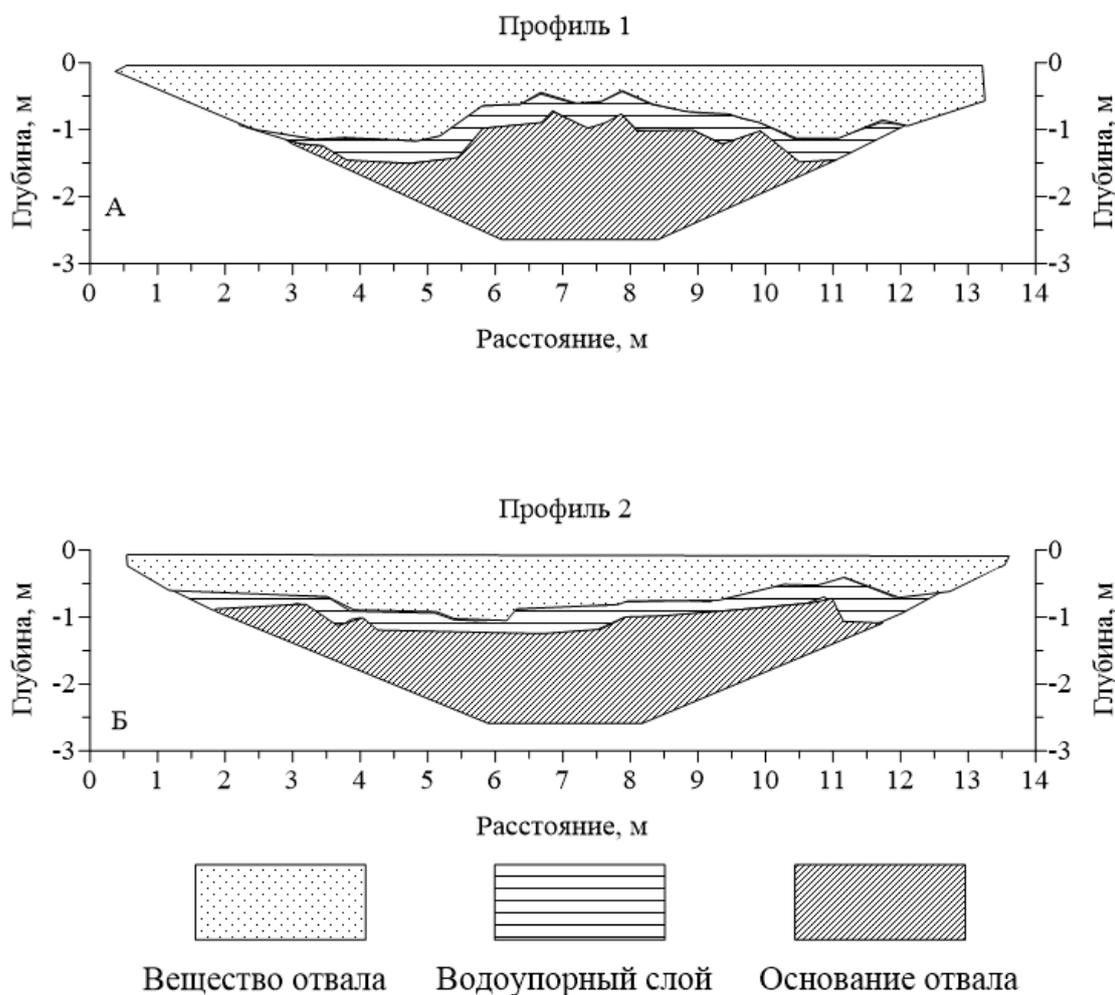


Рисунок 43 - Результат структурной интерпретации полученных геоэлектрических моделей для Комсомольского хвостохранилища

3.5 Описание методики построения структурных моделей для оценки объемов отходов ГОК на основе результатов исследования хвостохранилищ разных типов

Далее представлена обобщенная методика исследования техногенных объектов с учетом накопленного опыта и результатов исследования различного рода хранилищ отходов [Карин и др., 2020; Карин, Юркевич, 2024].

«Методика состоит из 7 основных блоков, являющихся последовательными этапами исследования техногенных объектов:

1) В первую очередь, для оценки размеров объекта в плане и особенностей поверхностного строения хвостохранилища проводится аэрофотосъемка и строится цифровая модель рельефа (ЦМР) и ортофотоплан. ЦМР позволяет оценить объем хранилища относительно самой нижней точки в пределах видимых границ. 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, выделяемых по УЭС. На основании карты распределения кажущихся УЭС планируется расположение профилей ЭТ и точек геохимического опробования.

3) Далее проводится съемка методом электротомографии, определяются нижние границы хвостохранилища и строятся двумерные и трехмерные геоэлектрические модели. На основании этих моделей вещество хвостохранилища 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 одномерную модель, созданную на этапе 4.

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

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 построены 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 (золота или мышьяка) возможен, когда известно его усредненное

количество на один кубический метр вещества отвала по данным о химическом составе вещества» [Карин и др., 2020].

3.6 Апробация методики построения моделей для оценки объемов отходов ГОК на хвостохранилище Белоключевской отвал

Проведены комплексные исследования с применением разработанной методики хвостохранилищ сульфидсодержащих отходов на Белоключевском отвале. Данные электроразведочных методов, дополненные аэрофотосъемкой и геохимическим опробованием, позволили выявить зональность среды и оценить объем хранилища.

Для проведения аэрофотосъемки был применен квадрокоптер Dji Mavic Air, в программе Drone Harmony создавался план полета квадрокоптера, а также частота и угол фотосъемки. Для фотосъемки использовалась штатная камера дрона. Полученные данные загружались в демоверсию программы PhotoScan компании Agisoft (Россия). В результате обработки фотографий программа PhotoScan создает облако общих точек для фотографий, на основании которых определяются необходимые расстояния и строится ортофотоплан и карта высот. Высота полета квадрокоптера составляла 30 м и задавалась такой, чтобы разрешения 12 мегапиксельной камеры хватило для получения качественного результата, и окружающие деревья или другие высотные объекты не мешали полету.

Метод электротомографии был реализован с помощью аппаратуры Скала 48к12 [<http://nemfis.ru/siber-48k12>], шаг между электродами по профилю составлял 1 м, расстояние между профилями – 2 м, всего было изучено 6 профилей, общая площадь исследований составила 517 м². Данные электротомографии были обработаны в программе Res3dinv. Объем веществ с сопротивлением до 20 Ом·м рассчитывался в программе Surfer. Для этого по полученным разрезам проводилось выделение координат изолиний 20 Ом·м с помощью функции Digitize, по которым строились две поверхности, ограничивающие интересующий объем среды сверху и снизу. Специальная

функция Volume программы Surfer позволяет рассчитать объем пространства, расположенный между двумя поверхностями.

На Рисунках 44 и 45 показаны ортофотоплан и карта высот Белоключевского отвала.

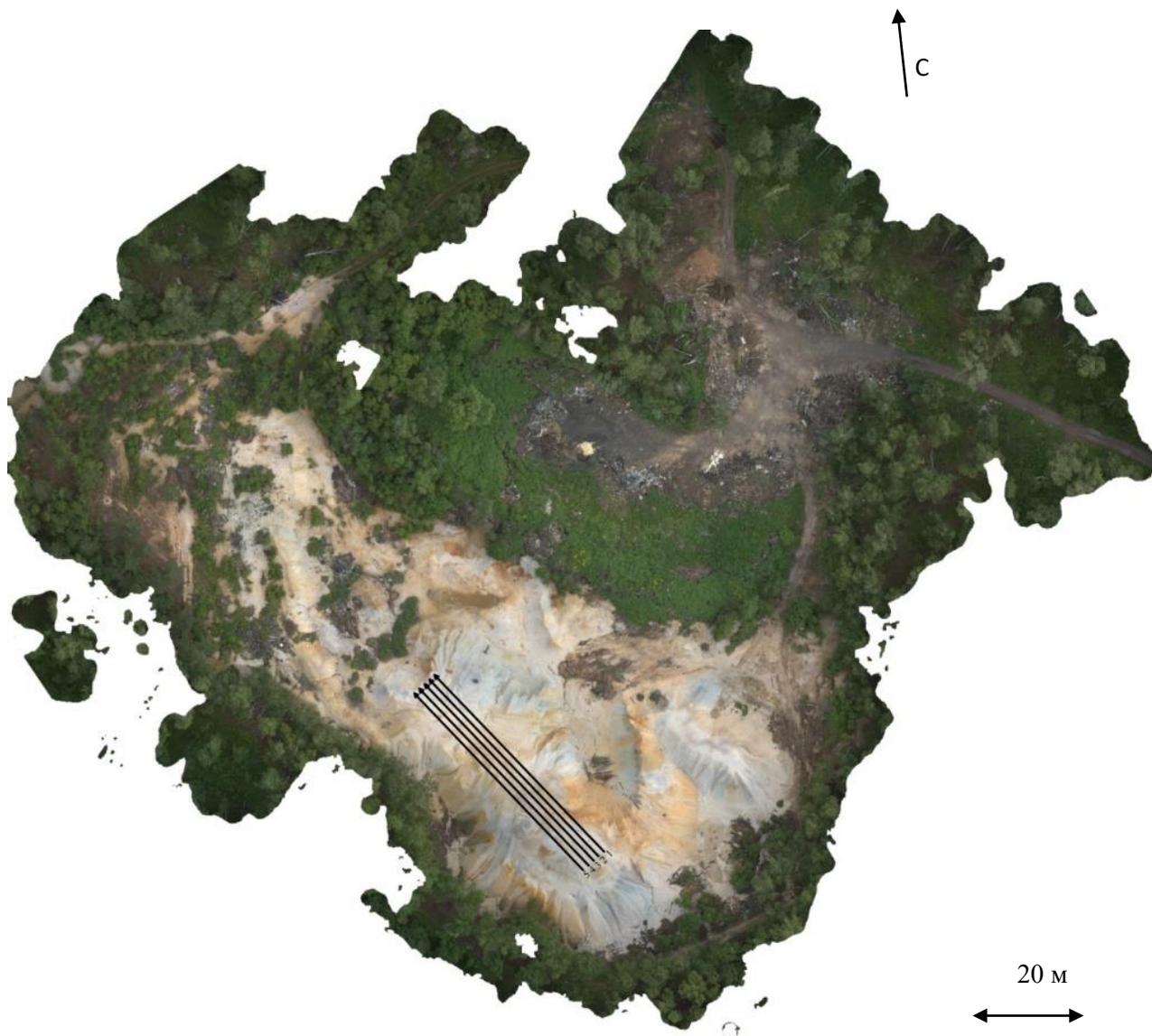


Рисунок 44 - «Профили электротомографии на Белоключевском отвале и ортофотоплан исследуемого объекта» [Карин и др., 2020]

Трехмерная геоэлектрическая модель показана на Рисунке 46. Изоповерхностью, построенной по УЭС в $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, обозначенной желтым цветом, ограничивается среда объемом 2126 м^3 , отходы в этой области имеют УЭС менее $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

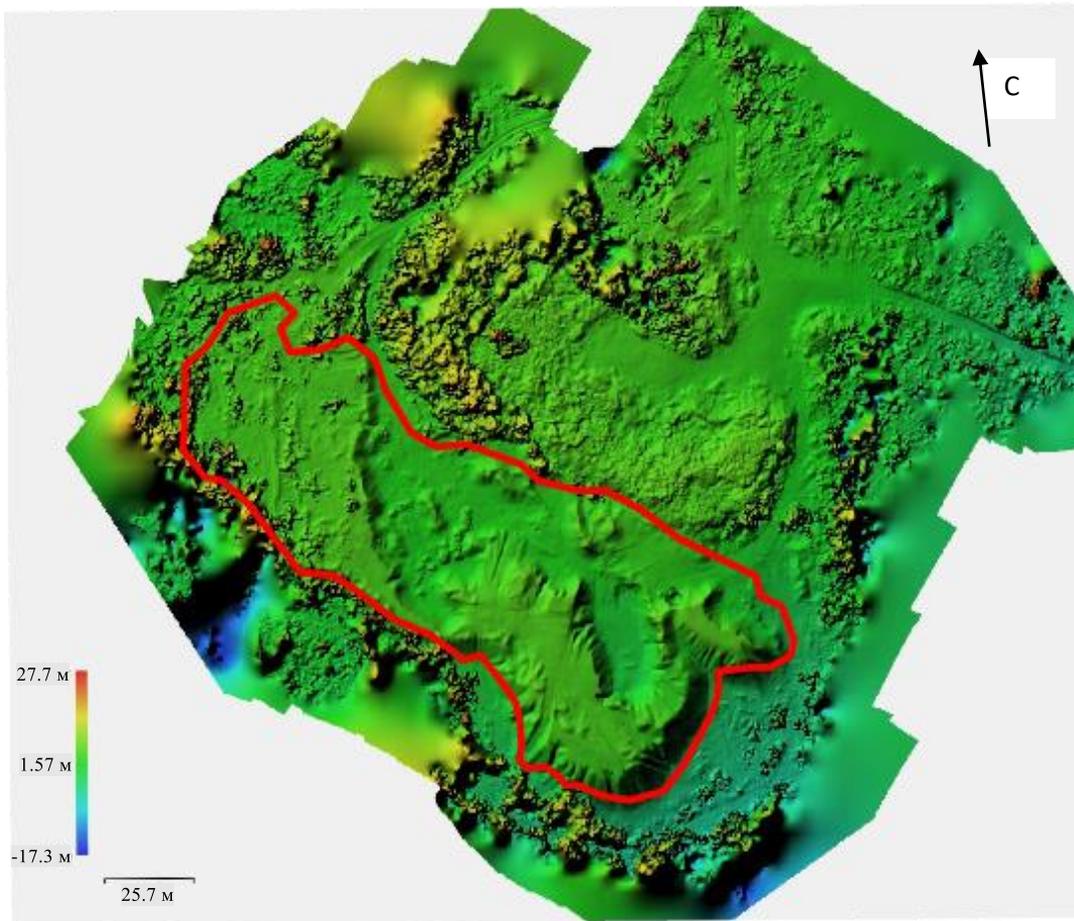


Рисунок 45 – «Карта высот Белоключевского отвала» [Карин и др., 2020]

В Таблице 4 приведены массы элементов в теле отвала, рассчитанные по данным об объемах вещества, полученных автором методами электротомографии и аэрофотосъемки, и о химическом составе вещества отвала.

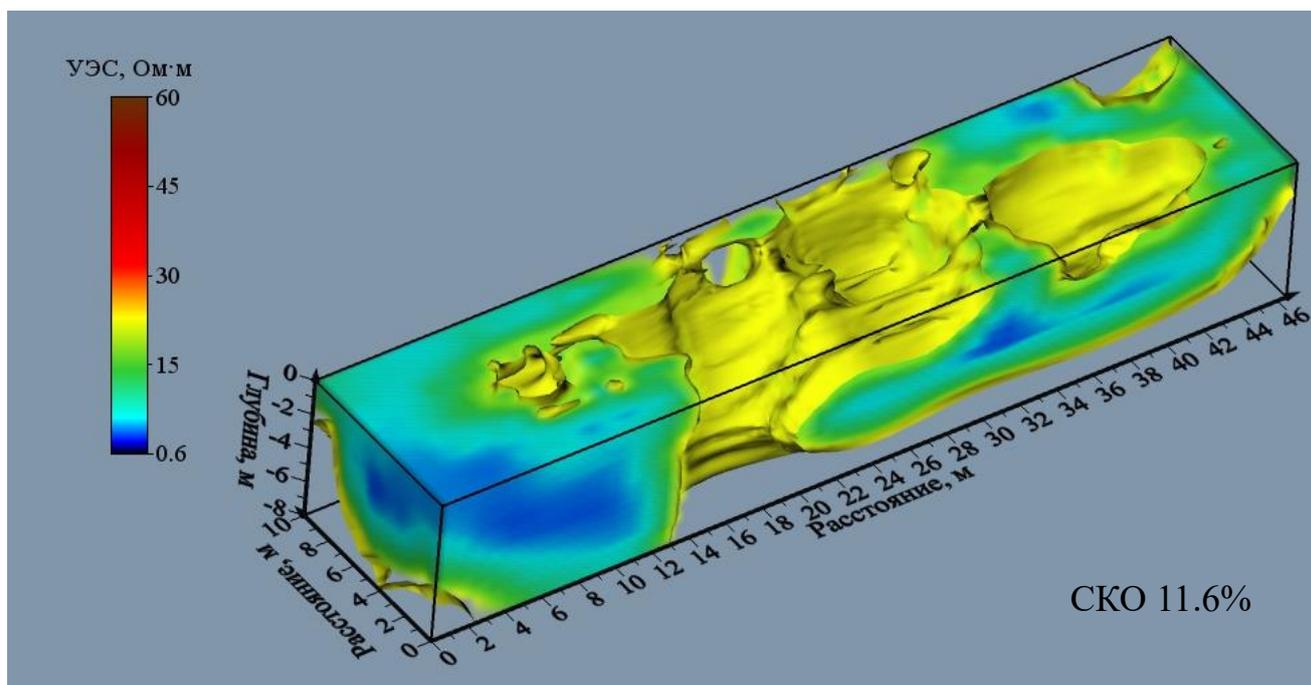


Рисунок 46 - Геоэлектрическая модель участка Белоключевского отвала по данным трехмерной инверсии в программе Res3dinv

Таблица 4 - Количество отходов в теле отвала по данным ЭТ и АФС

	По данным ЭТ (460 м ²), кг	По данным АФС (для всего отвала), кг
Железо (Fe)	290000	11000000
Медь (Cu)	700	23000
Цинк (Zn)	350	16000
Мышьяк (As)	1200	63000
Кадмий (Cd)	1.3	70
Золото (Au)	0.0002	100
Ртуть (Hg)	0.03	15000

Поскольку основным элементом перерабатываемой руды является пирит, то содержание железа в теле отвалов наибольшее, количество мышьяка составляет 63 тонны, золота и кадмия суммарно – менее 200 кг. Стоит отметить, что массы компонентов, посчитанные по данным электротомографии, относятся только к отходам с удельным сопротивлением до 20 Ом·м на участке отходов, исследованном серией параллельных профилей ЭТ. Количество веществ по данным аэрофотосъемки - объем отходов, рассчитанный относительно самой нижней точки на дневной поверхности в пределах данных АФС.

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 хвостохранилища используются для расчета усредненного количества потенциально ценных, токсичных компонентов и общего объема вещества отходов. Таким образом, восполнен недостаток существующих подходов к изучению техногенных объектов хранения отходов горно-обогатительных комбинатов, заключающийся в отсутствии систематизированной последовательности действий для получения необходимого минимума информации, по которой в дальнейшем возможно построить структурную модель исследуемого объекта. Как правило в рассмотренных подходах демонстрируется работоспособность выбранных методов, но не предлагается конкретная методика их применения, в том числе при комплексировании.

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

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 хвостохранилищ: Белоключевское, Дюков Лог, Талмовские пески и Комсомольское.

Таким образом, решена задача разработки методики построения геоэлектрических и структурных моделей хвостохранилищ для оценки количеств 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 определению 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. Предложенный подход повысит достоверность 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 объема хвостохранилища, обнаружение путей миграции веществ за пределы объекта 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.

Список литературы

1. Айриянц А. А. Сульфидные техногенные системы как источник поступления тяжелых металлов в окружающую среду: дис. – Новосибирск, 1999. – 26 с.
2. Арзамасцев Е. В. и др. Электромагнитная система для непрерывного индуктивного профилирования //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – №. 6. – С. 91-97.
3. Алёшин М. В. Использование беспилотных летательных аппаратов на примере phantom 4 (standard) для создания цифровых моделей рельефа //Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке. – 2017. – С. 23-29.
4. Балков Е. В. и др. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения //Геофизика. – 2012. – №. 6. – С. 54-63.
5. Балков Е. В. и др. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям //Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – №. 5. – С. 783-791.
6. Балков Е. В. Малоглубинные наземные параметрические зондирования с помощью компактной аппаратуры //9th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2013. – С. sp-346-00016.
7. Балков Е. В. Технология малоглубинного частотного зондирования //Геофизика. – 2011. – №. 6. – С. 42-47.
8. Балков Е. В., Адайкин А. А. Управление аппаратурой частотного электромагнитного зондирования с помощью карманного компьютера //Геоинформатика. – 2008. – Т. 33. – №. 4.
9. Бобачев, А. А. Возможности электротомографии при малоглубинных и прибрежных исследованиях / А. А. Бобачев // Инженерная и рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и

выставки, Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 138. – DOI 10.3997/2214-4609.202152158. – EDN JZTMLO.

10. Бобачев А. А. и др. Электрометрические исследования на территории хвостохранилища горно-обогатительного комбината //Разведка и охрана недр. – 2006. – №. 12. – С. 25-29
11. Болгов Г. П. Сульфиды Салаира. Урская группа полиметаллических месторождений //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1937. – Т. 58. – №. 3. – С. 45-96.
12. Бортникова С. Б. Геохимия техногенных систем. – Гео, 2006.
13. Бортникова С. Б. и др. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. – Изд-во СО РАН, Филиал" Гео", 2003. – Т. 854.
14. 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. (К1)
15. Быков А.Л., Костюк А.С., Быков В.Л., Быков Л.В., Татаурова Л.В., Орлов, П.В., Погарский П.М. Применение материалов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для картографического обеспечения археологических работ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 139–144.
16. Быков Л. В. Татаурова, Л.В., Орлов П.В., Анисимов А.Е., Полухин Р.Л., Бартенев С.В. Геодезические работы на археологическом памятнике XVII-XVIII века «Ананьино» // Интерэкспо ГЕОСибирь. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 64–67.
17. Варфоломеев, А. Ф., Коваленко, А. К., Манухов, В. Ф., & Калашникова, Л. Г. Особенности технологии аэрофотосъёмки с применением беспилотных

- воздушных судов //Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – №. 8. – С. 58-64.
18. Гагарин Л. А., Волгушева Н. Э., Башарин Н. И. Использование беспилотных летательных аппаратов в геокриологических исследованиях //природные ресурсы и экология дальневосточного региона. – 2017. – С. 13-16.
 19. Гафуров А. М. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии //Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2017. – Т. 159. – №. 4.
 20. Гафуров А. М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии //Региональные геосистемы. – 2019. – Т. 43. – №. 2.
 21. Гоглев Д. А. Маловысотная аэромагнитная съемка с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) //Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения. – 2018. – С. 357-358.
 22. Гук А. П., Антипов И. Т. Современное состояние и перспективное развитие фотограмметрических технологий, дистанционных методов и мониторинга по аэрокосмической информации //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 5. – С. 3-8.
 23. Давыдов, В. А. Применение методов электрметрии при изучении россыпных месторождений золота Хабаровского края / В. А. Давыдов // Тихоокеанская геология. – 2023. – Т. 42, № 3. – С. 38-51. – DOI 10.30911/0207-4028-2023-42-3-38-51. – EDN TSLZDA.
 24. Ю. Г. Карин, Н. В. Юркевич. 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.

25. 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.
26. 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
27. Карин, Ю. Г., Юркевич, Н. В., Осипова, П. С., & Ельцов, И. Н. (2017). Геоэлектрические модели хвостохранилищ по геофизическим и геохимическим данным [Электронный ресурс]. In Трофимуковские чтения-2017: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых (pp. 249-252).
28. Куликов, В. А. Возможности электротомографии при оценке качества битуминозных песков / В. А. Куликов, В. А. Поликарпова // Электроразведка 2021: сборник тезисов научно-практической конференции, Онлайн-конференция, 24–26 марта 2021 года. – Москва: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – С. 121-128. – EDN UQCHZR.
29. Куликов, В. А. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м / В. А. Куликов, А. А. Бобачев, А. Г. Яковлев // Геофизика. – 2014. – № 2. – С. 39-46. – EDN SECXBL.
30. Куликов, В. А. Применение новых электроразведочных технологий при поисках и разведке рудных месторождений / В. А. Куликов, А. Г. Яковлев // ИНЖЕНЕРНАЯ, УГОЛЬНАЯ и РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА-2015.

Современное СОСТОЯНИЕ и ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ : Материалы конференции, Сочи, 28 сентября – 02 2015 года. – Сочи: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. – С. 15-17. – EDN UMREVP.

31. Куликов, В. А. Оценка эффективности наземных методов электроразведки при поисках рудоносных интрузий на разных участках Норильской рудной провинции / В. А. Куликов, Н. А. Кабанов, А. В. Королькова // Геофизика. – 2023. – № 3. – С. 51-57. – DOI 10.34926/geo.2023.19.11.007. – EDN АКРСРІ.
32. Мальцев К. А., Голосов В. Н., Гафуров А. М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях //Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2018. – Т. 160. – №. 3. – С. 514-530.
33. Манштейн А. К., Балков Е. В. Способ и устройство для индукционного частотного зондирования. – 2013.
34. Манштейн А. К., Панин Г. Л., Тикунов С. Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования „ЭМС “ //Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – №. 6. – С. 571.
35. Манштейн А. К., Панин Г. Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования //Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов. – 2008. – С. 195-197.
36. Манштейн Ю. А. и др. Об оценке экологического ущерба по данным электроразведки на примере исследований захоронения пестицидов //Инженерные изыскания. – 2016. – №. 4. – С. 34-38.
37. Манштейн Ю. А. и др. Поиск микросфер в золоотвале методами электротомографии и электромагнитного профилирования //Инженерные изыскания. – 2015. – №. 13. – С. 58-61.
38. Манштейн Ю. А., Балков Е. В. Подход к оценке экологического ущерба по данным электроразведки //10th EAGE Scientific and Practical Conference and

Exhibition on Engineering Geophysics 2014. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. – С. ср-398-00011.

39. Патент № 2726907 С1 Российская Федерация, МПК G01V 3/06. Система электротомографического мониторинга и электрод, предназначенный для использования в такой системе: № 2019117900 : заявл. 10.06.2019 : опубл. 16.07.2020 / Модин И. Н., Богданов М. И., Симонов А. В. [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве" (ООО "ИГИИС"). – EDN WDFFUD.
40. Модин И. Н., Скобелев А. Д., Большаков Д. К., Кувинов А. В. Геофизические исследования на шламонакопителе: повторные измерения три года спустя. // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024: Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки, Казань, 13–16 мая 2024 года. – Москва: ООО «Геомодель Развитие», 2024. – С. 395-398. – EDN WCEJSG.
41. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. - М.: Мир. 1987. – 288 с.
42. Рыбальченко В.В., Трусов А.И., Буддо И.В., Абрамович А.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Оцимик А.А., Агафонов Ю.А., Горлов И.В., Погребский А.В. Комплекс вспомогательных исследований на этапах разведки и разработки месторождений нефти и газа: от картирования многолетнемерзлых пород до поисков подземных вод для обеспечения бурения и эксплуатации. // Газовая промышленность. 2020. № 11/808. С. 20-28.
43. Р.Р. Валеев, Д.В. Колесников, И.В. Буддо, А.И. Ильин, А.А. Аксеновская, Н.А. Черкасов, Ю.А. Агафонов, В.А. Гринченко. Подход к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений Восточной Сибири (на примере Среднеботуобинского НГКМ). Геология, геофизика и разработка

нефтяных и газовых месторождений, январь (1) 2019, 2019. с. 55-67, DOI: 10.30713/2413-5011-2019-1-55-67.

44. Степанова С. П. Создание 3D моделей при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) //Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2017. – С. 4503-4508.
45. Тихонов А. А., Акматов Д. Ж. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №. 12. – С. 192-198.
46. Хлебникова Т. А., Ямбаев Х. К., Оприцова О. А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства //Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – №. 1. – С. 106-118.
47. Цветков В. Я., Андреева О. А. Геоинформационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры по данным мобильного лазерного сканирования //Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – №. 3. – С. 354-360.
48. Чикунов И. А. Мониторинг экологического состояния земли с помощью методов дистанционного зондирования //Modern Science. – 2020. – №. 11-1. – С. 431-435.
49. Шапаренко И. О., Манштейн Ю. А., Балков Е. В. Геофизические изыскания золотоотвала методами электротомографии и электромагнитного профилирования //10th EAGE Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering Geophysics 2014. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. – С. cp-398-00013.
50. Шеремецкая Е.Д., Иванов М.М., Ворошилов Е.В., Гаранкина Е.В., Беляев В.Р. Использование материалов крупномасштабной аэрофотосъемки беспилотными летательными аппаратами в целях изучения экстремальных

геоморфологических процессов. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС» – 2018 – Т. 24. – С. 158-170.

51. 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 (К1)
52. 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 – № 3(55) – С. 105-114 – 2023. (К2)
53. Abdul Nassir S. S. et al. Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys //Geophysical Prospecting. – 2000. – Т. 48. – №. 4. – С. 647-661.
54. Abrosimova, N., O. Gaskova, A. Loshkareva, A. Edelev, and S. Bortnikova. 2015. “Assessment of the Acid Mine Drainage Potential of Waste Rocks at the Ak-Sug Porphyry Cu–Mo Deposit.” Journal of Geochemical Exploration 157: 1-14. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.009.
55. Ackman T. E. An introduction to the use of airborne technologies for watershed characterization in mined areas //Mine Water and the Environment. – 2003. – Т. 22. – №. 2. – С. 62-68.
56. Adami A., Fregonese L., Gallo M., Helder J., Pepe M., Treccani D. Ultra light UAV systems for the metrical documentation of cultural heritage: applications for architecture and archaeology // Proc. 6th International Workshop Low Cost 3D-Sensors, Algorithms, Applications. - 2019. - Vol. 42. - P. 15-21.
57. Balia R. et al. Old municipal and industrial waste landfills: examples of possible application of geophysical survey techniques for assessment prior to reclamation //Multidiscip J Waste Resour Residues. – 2018.

58. Balkov E.V., Karin Y.G., Pozdnjakova O.A., Djad'kov P.G. Modern unmanned technology in archaeogeophysical studies // *Engineering and Mining Geophysics 2020: Conf. Proc. – EAGE, 2020. – Vol. 2020, № 1. – P. 1–11, doi: 10.3997/2214-4609.202051087.*
59. Barker R. D. Investigation of groundwater salinity by geophysical methods // *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume II: Environmental and Groundwater. – Society of Exploration Geophysicists, 1990. – C 201-212.*
60. Bauer P. et al. Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana // *Journal of Applied Geophysics. – 2006. – T. 60. – №. 2. – C. 126-141.*
61. Beard L. P., Tripp A. C. Investigating the resolution of IP arrays using inverse theory // *Geophysics. – 1995. – T. 60. – №. 5. – C. 1326-1341.*
62. Benson A. K., Payne K. L., Stubben M. A. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods-A case study // *Geophysics. – 1997. – T. 62. – №. 1. – C. 80-86*
63. Benyassine E. M. et al. An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2017. – T. 22. – №. 4. – C. 315-324.*
64. Binley A. et al. Vadose zone flow model parameterization using cross-borehole radar and resistivity imaging // *Journal of Hydrology. – 2002. – T. 267. – №. 3. – C. 147-159.*
65. Booterbaugh A. P., Bentley L. R., Mendoza C. A. Geophysical characterization of an undrained dyke containing an oil sands tailings pond, Alberta, Canada // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2015. – T. 20. – №. 4. – C. 303-317.*
66. Bortnikova, S. Acid mine drainage migration of Belovo zinc plant (South Siberia, Russia): multidisciplinary study / S. Bortnikova, Y. Manstein, O. Saeva, N. Yurkevich et al. // *Water Security in the Mediterranean Region, NATO*

Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer - 2011. – P. 191-208.

67. Bortnikova, S. The combination of Geoelectrical Measurements and Hydro-Geochemical Studies for the Evaluation of Groundwater Pollution in Mining Tailings Areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich, E. Bessonova, Y. Karin, O. Saeva // The Handbook of Environmental Chemistry . Springer Berlin Heidelberg, ISSN: 1867-979X (Print) 1616-864X (Online), DOI: 10.1007/698_2013_234, 2013.
68. Burton B. L., Ball L. B. Geophysical investigation of Red Devil mine using direct-current resistivity and electromagnetic induction, Red Devil, Alaska, August 2010. – U. S. Geological Survey, 2011.
69. Buselli G., Lu K. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods //Journal of Applied Geophysics. – 2001. – T. 48. – №. 1. – C. 11-23.
70. Buselli G., Lu K. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods //Journal of Applied Geophysics. – 2001. – T. 48. – №. 1. – C. 11-23.
71. Camarero P. L., Moreira C. A., Pereira H. G. Analysis of the physical integrity of earth dams from electrical resistivity tomography (ERT) in Brazil //Pure and Applied Geophysics. – 2019. – T. 176. – №. 12. – C. 5363-5375.
72. Campbell D.L., Horton R.J., Bisdorf R.J., Fey D.L., Powers M.H., Fitterman D.L. Some geophysical methods for tailings/mine waste rock // Tailings and Mine Waste. – 1999/ - P. 35–43.
73. Cortada U. et al. Assessment of tailings pond seals using geophysical and hydro chemical techniques //Engineering Geology. – 2017. – T. 223. – C. 59-70.
74. DeGroot-Hedlin C., Constable S. Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data //Geophysics. – 1990. – T. 55. – №. 12. – C. 1613-1624.

75. Dubbini M., Curzio L. I., Campedelli A. Digital elevation models from unmanned aerial vehicle surveys for archaeological interpretation of terrain anomalies: Case study of the Roman castrum of Burnum (Croatia) //Journal of Archaeological Science: Reports. – 2016. – T. 8. – C. 121-134.
76. Epov, M. I., Yurkevich, N. V., Bortnikova, S. B., Karin, Y. G., & Saeva, O. P. (2017). 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, 58(12), 1543-1552.
77. Georgopoulos A. 3D virtual reconstruction of archaeological monuments //Mediterranean Archaeology & Archaeometry. – 2014. – T. 14. – №. 4.
78. Gomez-Ortiz D. et al. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) //Near Surface Geophysics. – 2010. – T. 8. – C. 6574.
79. González-Morales M., Rodríguez-González M. Á., Fernández-Pozo L. Status of Ecosystem Services in Abandoned Mining Areas in the Iberian Peninsula: Management Proposal //Toxics. – 2023. – T. 11. – №. 3. – C. 275.
80. Grangeia C. et al. Mine tailings integrated investigations: the case of Rio tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal) //Engineering Geology. – 2011. – T. 123. – №. 4. – C. 359-372.
81. Howland M. D., Kuester F., Levy T. E. Photogrammetry in the field: Documenting, recording, and presenting archaeology //Mediterranean Archaeology and Archaeometry. – 2014. – T. 14. – №. 4. – C. 101-108.
82. Hudson E. et al. Integrated hydrological and geophysical characterization of surface and subsurface water contamination at abandoned metal mines //Water, Air, & Soil Pollution. – 2018. – T. 229. – №. 8. – C. 1-14.
83. Jessop M. et al. Magnetometric resistivity: a new approach and its application to the detection of preferential flow paths in mine waste rock dumps //Geophysical Journal International. – 2018. – T. 215. – №. 1. – C. 222-239.

84. 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. – C. 35-35
85. Kontopoulos A. Acid mine drainage control. – 1998.
86. Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues // Progress in physical geography. - 2008. - Vol. 32, № 1. - P. 31-49.
87. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1 //Geophysical prospecting. – 1996. – T. 44. – №. 1. – C. 131-152.
88. Loke M.H. 2009. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys.
89. López J.A.B., Jiménez G.A., Romero M.S., García E.A., Martín S.F., Medina A.L., Guerrero J.A.E. 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain) //Journal of Archaeological Science: Reports. - 2016. - Vol. 10. - P. 495-506, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.11.022>.
90. Lottermoser B. G. Mine Waste – Germany, Berlin: Springer, 2007. – 304 p.
91. Martín-Crespo T. et al. Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain) //Engineering Geology. – 2018. – T. 232. – C. 135-146.
92. Martínez J. et al. A multidisciplinary characterization of a tailings pond in the Linares-La Carolina mining district, Spain //Journal of Geochemical Exploration. – 2016. – T. 162. – C. 62-71
93. Martín-Moreno C. et al. Waste dump erosional landform stability—a critical issue for mountain mining //Earth Surface Processes and Landforms. – 2018. – T. 43. – №. 7. – C. 1431-1450.

94. Nearing G. S. et al. Electromagnetic induction for mapping textural contrasts of mine tailing deposits //Journal of Applied Geophysics. – 2013. – T. 89. – C. 11-20.
95. Nordstrom D. K., Blowes D. W., Ptacek C. J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update //Applied Geochemistry. – 2015. – T. 57. – C. 3-16.
96. Oldenburg D.W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys // Geophysics. – 1999. – V. 64. – I. 2. – P. 403–416.
97. Parcero-Oubiña C. et al. Mapping on a budget a low-cost UAV approach for the documentation of prehispanic fields in Atacama (n. Chile) //SAA Archaeol Rec. – 2016. – T. 2016. – C. 17-21.
98. Poirier N., Baleux F., Calastrenc C. The mapping of forested archaeological sites using UAV LiDAR. A feedback from a south-west France experiment in settlement & landscape archaeology // Archéologies numériques. - 2020. - Vol. 4, №. 2. - P. 1-24, <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2020.0556>.
99. Poisson J. et al. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile //Journal of Applied Geophysics. – 2009. – T. 67. – №. 2. – C. 179-192.
100. Risbøl O., Gustavsen L. LiDAR from drones employed for mapping archaeology–Potential, benefits and challenges //Archaeological Prospection. – 2018. – T. 25. – №. 4. – C. 329-338.
101. S. Bortnikova, N. Yurkevich, E. Bessonova, Y. Karin, O. Saeva, The combination of Geoelectrical Measurements and Hydro-Geochemical Studies for the Evaluation of Groundwater Pollution in Mining Tailings Areas, The Handbook of Environmental Chemistry . Springer Berlin Heidelberg, ISSN: 1867-979X (Print) 1616-864X (Online), DOI: 10.1007/698_2013_234, 2013
102. Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // Journal of Geochemical Exploration. – 1995. - V. 52. - P. 5-23.

103. Themistocleous K. DEM modeling using RGB-based vegetation indices from UAV images //Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoformation of the Environment (RSCy2019). – SPIE, 2019. – T. 11174. – C. 499-506.
104. Yurkevich N. V., Abrosimova N. A., Bortnikova S. B., Karin Y. G., Saeva O. P. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2017. – V.99. – I.9-10. – pp. 1328-1345.
105. Yurkevich N., Yurkevich N., Bortnikova S., Karin Y. Current State of the Abandoned Mine Wastes: Environmental Risks, Prospects for Extraction and Reclamation // Abstracts of The Second Eurasian RISK2020 Conference and Symposium (12–19 April 2020; Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia). – 2020. – P. 153–154, doi: 10.21467/abstracts.93.83.
106. Yurkevich, N.V. 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 / N.V. Yurkevich, O.P. Saeva, Y.G. Karin // Toxicological & Environmental Chemistry DOI: 10.1080/02772248.2015.1041955