

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
им. А.А. ТРОФИМУКА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

На правах рукописи

ШАПАРЕНКО Илья Олегович

**СТРОЕНИЕ ЗОН ДЕСТРУКЦИИ
ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ
В МЕЖГОРНЫХ ВПАДИНАХ АЛТАЯ И
НАД НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНЫМИ
ЗАЛЕЖАМИ В ПРИКАСПИИ**

1.6.9 – геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель –
д. г.-м. н. Н.Н. Неведрова

НОВОСИБИРСК
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
Глава 1. Аналитический обзор известных решений.....	10
1.1 Метод сопротивлений. Круг решаемых задач	10
1.2. Опыт применения геофизических методов для исследования разломных зон	15
1.3. Определение условий образования и развития природных карстово- суффозионных процессов с привлечением геофизических методов.....	19
1.4 Мониторинг геоэлектрических параметров деструктивных участков геофизическими методами	22
Глава 2. Геоэлектрическое строение и мониторинг зон деструкции по данным метода электротомографии в районе Горного Алтая	26
2.1. Возможности метода электротомографии при построении моделей разломных зон. Результаты интерпретации	28
2.1.1 Чуйская впадина.....	28
2.1.2 Уймонская впадина.....	41
2.1.3 Курайская впадина.....	44
2.2 Результаты численного моделирования	46
2.3 Мониторинг геоэлектрических параметров в разломных зонах Горного Алтая. Интерпретация	60
2.3.1 Чуйская впадина.....	61
Глава 3. Изучение суффозионно-просадочных процессов в Прикаспийской впадине методом электротомографии	69
Заключение	94
Литература	96

ВВЕДЕНИЕ

Объекты исследования – разломные структуры под осадочными отложениями во впадинах Горного Алтая и суффозионные воронки над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина), рассматриваемые как частные случаи подповерхностных неоднородностей верхней части геологической среды.

Актуальность определяется недостаточностью знаний о строении участков с разломными структурами в сейсмоактивных регионах и участков в зонах развития суффозии над залежами углеводородов. Во впадинах Горного Алтая при повышении сейсмической активности участки с разломами относятся к опасным для населения и его хозяйственной деятельности также, как и зоны с развитием суффозионных процессов над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина), которые угрожают коммуникациям, трубопроводам и в целом могут привести к разрушениям промышленной инфраструктуры.

Поскольку суффозионные воронки развиваются непосредственно на дневной поверхности, то оценка их размеров использовалась как априорная информация. В отличие от этого, точные размеры разломных структур по участкам впадин под осадочными отложениями не известны, поскольку они не выделяются визуально.

Решение актуальной задачи изучения подповерхностных неоднородностей, к которым относятся объекты исследований диссертационной работы, базируется и объединяется использованием высокоразрешающей электротомографии с её развитыми аппаратными и программно-алгоритмическими средствами двух- и трехмерного численного моделирования, и инверсии данных.

Из измерений на системе профилей определяются области и глубины проявления опасных процессов, а также распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) отложений. Измерения по площади

дают возможность получить пространственную (трёхмерную) геоэлектрическую модель деструктивных участков с целевыми объектами. Таким образом, электротомографию можно эффективно использовать в зонах возникновения и развития опасных геодинамических процессов как для изучения строения, так и для мониторинга их состояния.

Цель исследования – повышение достоверности и однозначности интерпретации данных электротомографии в зонах деструкции (разломы, суффозия).

Научные задачи:

1. Определение строения разломных зон в сейсмоактивных районах Горного Алтая по данным электротомографии с использованием численного решения соответствующих прямых и обратных задач;
2. Выявление источников суффозионно-просадочных процессов над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина) путем комплексного анализа геологической информации, а также данных электрических и электромагнитных зондирований.

Методы исследования и фактический материал

Теория базируется на уравнениях Максвелла для стационарных электрических полей. Физические законы Ома, Кирхгофа, дифференциальные уравнения Лапласа и Пуассона лежат в основе решения прямых и обратных задач электроразведки постоянным током.

Основной метод исследования – метод постоянного тока (электротомография). Для измерений использовалась аппаратура «Скала 48», с глубиной исследования до 80–100 м в зависимости от используемой установки и геоэлектрического разреза.

В работе использовался значительный объём полевых данных электротомографии, полученных под руководством и при непосредственном участии автора диссертации в Горном Алтае и над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина). Для выбора конкретных объектов

исследований в межгорных впадинах Горного Алтая автор опирался на многолетний опыт полевых наблюдений сотрудников лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН, а также на априорные геологические данные.

При обработке и интерпретации измерений применялись программно-алгоритмические средства для построения двумерных и трёхмерных геоэлектрических моделей среды. Для подготовки к полевым измерениям и при интерпретации данных электротомографии (ЭТ) проводилось численное трёхмерное моделирование с использованием программных пакетов, разработанных в ИНГГ СО РАН: SCALA-48 (GPU), DiInSo.

Для инверсии полевых и синтетических данных, построения геоэлектрических разрезов и трёхмерных моделей применялись программные средства Res2DInv, ZondRes3D, ERTLab, DiInSo.

Анализировалась геологическая информация для сопоставления и верификации результатов, полученных по данным электротомографии. В лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН при участии автора проводились полевые работы методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), результаты которых также привлекались для интерпретации данных и анализа результатов ЭТ.

Защищаемые научные результаты:

1. По данным электротомографии зоны разломов Чуйской, Курайской, Уймонской впадин Горного Алтая характеризуются пониженными значениями УЭС (20–300 Ом·м, для многолетнемерзлых пород до 1500 Ом·м) относительно вмещающих отложений, а их ширина изменяется в пределах 20 – 150 м.

2. На участке со всеми суффозионными воронками над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина) электротомография показала чередование вытянутых вдоль речной террасы протяженных низко- и высокоомных зон, обусловленных следами

поверхностных водных потоков, формирующих их структуру. Вымывание глиняного и солевого «цемента» по границам высокоомных зон привело к депрессии приповерхностного горизонта до глубин 15 – 30 м с просадкой подповерхностных отложений.

Научная новизна

По данным электротомографии по впадинам Горного Алтая построены характерные 2-3D геоэлектрические модели с выявленными под осадочными отложениями разломами, обоснованные численным решением соответствующих прямых и обратных задач.

Впервые построена наглядная детальная трёхмерная геоэлектрическая модель суффозионной низкоомной воронки глубиной 9 м с небольшой центральной областью повышенного УЭС за счет разуплотнения слагающих её пород.

По данным электротомографии и в результате комплексного геолого-геофизического анализа выявлены причины образования суффозионных воронок. Вымывание глинистых и солевых частиц в подповерхностной зоне способствовало депрессии отложений до глубин 15 – 30 м с последующей их просадкой. Выявлена развивающаяся суффозионная воронка.

На основе сопоставительного анализа работы программных комплексов моделирования и инверсии данных электротомографии показано, что достоверность интерпретации подтверждается перекрестным сравнением их результатов, а также привлечением численного решения прямых и обратных задач. В частности, установлено, что по измерениям установкой Шлюмберже нельзя количественно определить углы падения сместителей разломов.

Личный вклад соискателя

1. Планирование полевых работ, выбор объектов исследования, установок, оптимального расположения профилей, обоснование методики измерений методом электротомографии на участках исследования.

2. Привлечение и анализ априорных материалов: геологических, скважинных данных, результатов других геофизических методов (ВЭЗ, ЗСБ).

3. Выполнение полевых работ комплексом методов электроразведки в Горном Алтае и в Прикаспийской впадине в 2015 – 2023 гг.

4. Контроль качества измерений, первичная обработка полевых данных (фильтрация аномальных значений, анализ качества измерений).

5. Интерпретация всех полученных полевых данных, построение геоэлектрических разрезов и трёхмерных моделей. Сопоставление результатов интерпретации ЭТ с ВЭЗ и ЗСБ.

6. Численное моделирование разломных структур с применением сторонних программных пакетов Res2D, ZondRes2D, а также созданных в ИНГГ СО РАН (SCALA-48 (GPU), DiInSo), и анализ результатов. Сопоставление результатов инверсии модельных данных. Выводы о возможностях использованных программных средств для интерпретации данных ЭТ.

7. Участие в постановке задач исследования.

8. Подготовка публикаций и докладов на конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

Модели разломных зон во впадинах Горного Алтая по данным метода ЭТ позволяют получить о них необходимую актуальную информацию. Крупные региональные кайнозойские разломы в обрамлении впадин Горного Алтая отличаются значительными амплитудами смещения и обычно хорошо выражены в рельефе. Но внутривпадинные межблоковые разломы, обычно перекрытые осадочными отложениями, не определяются геологическими методами, а по данным ЭТ они характеризуются зонами с пониженными значениями УЭС и хорошо выделяются на разрезах относительно более высокоомных вмещающих горных пород. Полученные результаты имеют значение для понимания этапов формирования геологических структур в алтайских впадинах. Информация об активных разломах помогает избежать катастрофических последствий при прокладке дорог, трубопроводов, постройке новой инфраструктуры. Также она важна для ряда геологических

дисциплин: геодинамики, структурной геологии, неотектоники Горного Алтая.

На участке с суффозионными воронками получены полевые данные ЭТ высокого качества, что позволило по результатам интерпретации и комплексного анализа геолого-геофизических материалов сформулировать возможные причины их образования и выявить наиболее опасные воронки.

Апробация работы и публикации

Результаты исследования известны научной общественности. Они изложены в 22 научных публикациях, в том числе пять статей в научных рецензируемых журналах, рекомендованных Перечнем ВАК, **все статьи входят в категорию K1:**

- Литосфера, 2025;
 - Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2023;
 - Journal of Asian Earth Sciences, 2020;
 - Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019;
 - Geodynamics and Tectonophysics = Геодинамика и тектонофизика, 2018;
- и 17 публикаций в материалах российских и международных конференций и симпозиумов (Интерэкспо Гео-Сибирь (Новосибирск, 2016); Геодинамика, геомеханика и геофизика. Всероссийский семинар (Алтай, Денисова пещера, 2016); 13-й Международный геофизический научно-практический семинар (Санкт-Петербург, 2016); Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. Конгр (Новосибирск, 2017); Седьмой Международной симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Киргизия, Бишкек, 2017); Науки о Земле. Современное состояние: Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции (Шира, Республика Хакасия, 2017); Марчуковские научные чтения (Новосибирск, 2018); Интерэкспо Гео-Сибирь (Новосибирск, 2018); Материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием (Москва, 2018); Строение

литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (Иркутск, 2018); Интерэкспо ГЕО-Сибирь (Новосибирск, 2019); Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 2019); Интерэкспо Гео-Сибирь (Новосибирск, 2020); Восьмой Международной симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (Киргизия, Бишкек, 2021); Интерэкспо Гео-Сибирь (Новосибирск, 2021); X International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (Novosibirsk, 2022); Геосочи-2022. Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики: Материалы международной научно-практической конференции (г. Сочи, 27-29 апреля 2022 г.); Интерэкспо ГЕО-Сибирь (Новосибирск, 2023).

Работы выполнялись в рамках проекта ФНИ № 0331-2019-0015, базового проекта ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0025.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Н.Н. Неведровой за многолетнее сопровождение, наставничество и оказанную поддержку в процессе выполнения исследования.

Соискатель глубоко признателен академику РАН М.И. Эпову за интерес к диссертации, ценные замечания и рекомендации.

Автор выражает искреннюю благодарность коллегам из лаборатории электромагнитных полей: д.т.н. Е.В. Балкову, к.г.-м.н. А.Е. Шалагинову, к.ф.-м.н. И.В. Суроудиной, к.т.н. Ю.Г. Карину, к.г.-м.н. А.М. Санчаа, к.т.н. Г.Л. Панину, к.ф.-м.н. А.В. Мариненко, Д.И. Фадееву, П.В. Пономареву, З.Я. Кузиной.

Автор благодарит сотрудников ИНГГ СО РАН за конструктивные замечания и рекомендации: д.г.-м.н. Н.О. Кожевникова, д.г.-м.н. В.В. Оленченко, д.г.-м.н. В.Д. Суворова, к.т.н. В.В. Потапова.

Особую благодарность автор выражает коллегам из СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за оказанное содействие в проведении полевых работ: С.М. Бабушкину, Д.В. Кречетову, И.В. Коковкину, А.А. Болдареву.

Структура и объем работы

Квалификационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Содержит 113 страниц, 55 рисунков. Библиография включает 126 наименований. Последовательность изложения материала обусловлена логикой выполнения исследования.

Во введении определена цель и поставлены задачи работы, показана ее актуальность, представлены защищаемые научные результаты, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

Содержательная часть разбита на три главы. В первой представлен аналитический обзор известных решений, их достоинства и недостатки, во второй и третьей раскрыты этапы исследования.

В заключении сформулированы основные выводы по проведённым работам на исследуемых объектах, а также дальнейшие перспективы работы.

Глава 1. Аналитический обзор известных решений

1.1 Метод сопротивлений. Круг решаемых задач

Физические основы

Методы постоянного тока (или методы сопротивлений) начали применять для геофизических задач в начале 20 столетия. В 1912-1914 гг. Конрадом и Марселем Шлюмберже разработаны и внедрены в геофизическую практику вертикальные электрические зондирования, которые и в настоящее время относятся к базовым, классическим методам электроразведки. В эти же годы ими были предложены и опробованы методы электрического профилирования, естественного поля, вызванной поляризации.

Метод сопротивлений основывается на дифференциации горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). УЭС - физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока. В целом технология измерений достаточно простая. Контролируемый постоянный электрический ток подаётся в среду с помощью двух заземлённых питающих электродов. В зависимости от распределения УЭС в среде формируется распределение электрического потенциала. С помощью ещё одной пары заземлённых измерительных электродов измеряется разность потенциалов между этими электродами.

Метод электротомографии (ЭТ), имеющий ряд преимуществ по сравнению с уже существующими методами сопротивлений, начал развиваться с 80-гг. прошлого столетия, вначале за рубежом и затем в России. Одним из преимуществ ЭТ является использование многоэлектродной системы наблюдений, при этом питающие и приёмные электроды, расположенные на выводах электроразведочной косы, время от времени меняют свою роль, т.е. каждый электрод может быть генераторным и измерительным [Lowrie, 2007]. Использование метода ЭТ значительно ускоряет процесс полевых работ по сравнению с методом ВЭЗ [Loke et al.,

2013], а высокая плотность данных обуславливает его высокую разрешающую способность.

Рассмотрим вид протокола измерений для ЭТ на примере установки Шлюмберже (Рисунок 1). Шаг между электродами составляет 5 м. Каждому маркеру на диаграмме, соответствует одно положение четверки генераторно-приемных электродов ABMN. При этом маркер отнесен по горизонтали к центру установки, а по вертикали к эффективной глубине [Балков и др., 2012].

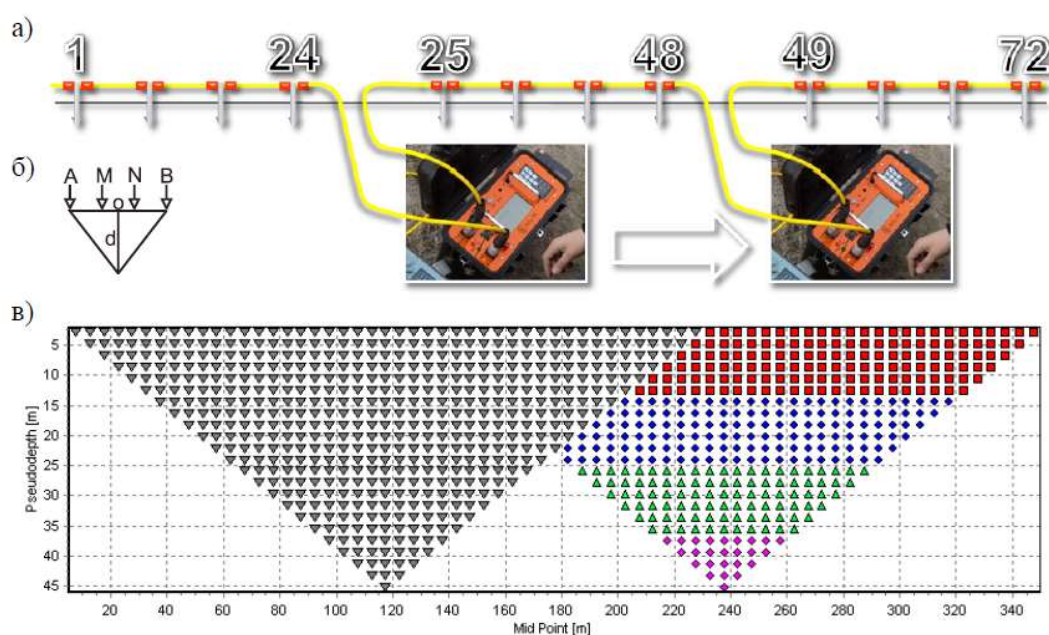


Рисунок 1 – Система измерений методом ЭТ: (а) Типичная схема расположения двух сегментов 24х-электродных кос с последующим переносом первого сегмента для непрерывного продолжения профиля. (б) Установка Шлюмберже. (в) Схема привязки результата измерения для симметричной установки Шлюмберже.

Важно рассмотреть возможности других установок для ЭТ, так как каждая из них имеет преимущества и недостатки в зависимости от геоэлектрических параметров среды и необходимой глубинности. Большая часть современной аппаратуры и программного обеспечения

электротомографии, как правило, поддерживает типы установок, представленные на Рисунке 2 [Dahlin and Zhou, 2004].

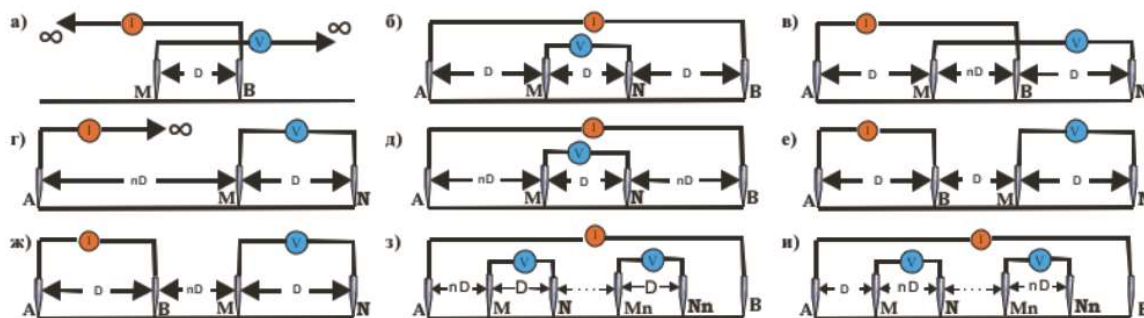


Рисунок 2 - Наиболее востребованные установки, применяемые в электротомографии: (а) двухэлектродная, (б) Веннера гамма-типа (в), (г) трёхэлектродная, (д) Шлюмберже, (е) Веннера β -типа, (ж) дипольная осевая, (з) градиентная, (и) градиентная срединная [Балков и др., 2009].

Двухэлектродная установка имеет наибольшее горизонтальное покрытие и глубинность, но в тоже время наименьшую разрешающую способность. Кроме того, она сложна в использовании из-за необходимости значительного удаления двух выносных электродов относительно установки. Трёхэлектродная установка имеет меньшую глубинность по сравнению с двухэлектродной, однако, так как в ней используется лишь один удалённый электрод, но она более устойчива к шумовым помехам. Установку Веннера принято использовать для изучения разрезов с горизонтальными и субгоризонтальными границами. Она обладает средней глубинностью и малым горизонтальным покрытием, но характеризуется хорошим уровнем сигнала.

Дипольная осевая установка чаще всего используется при поиске и исследовании вертикальных неоднородностей. У неё низкий уровень сигнала, среднее горизонтальное покрытие и немного меньшая глубинность, чем у Веннера.

Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубиной на 10% большей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием [Балков, 2010]. Поэтому большая часть работ была выполнена с использованием установки Шлюмберже.

Стоит отметить, что метод ЭТ активно развивается. Некоторые зарубежные авторы за счёт увеличенного шага между электродами и усовершенствования аппаратуры достигают глубин до 150 м [Zhu et.al., 2017]. В России существуют разработки ЭТ с глубиной до 300-400 м, используемые для поиска и оконтуривания рудных месторождений [Куликов, Бобачев, Яковлев, 2014].

В настоящее время электротомография применяется для широкого спектра задач, таких как поиск цветных металлов, сульфидных руд в сложно построенных геологических средах [Бабушкин и др., 2017], разведка рассеянных рудных тел, локальная доразведка различных месторождений, картирование рельефа кристаллического фундамента [Nagaiah E. et al., 2022; Kumar et al., 2022; Olenchenko V. and Osipova P., 2022]. Кроме того, метод используется для решения экологических проблем [Шкиря М.С. и др., 2023], например, при исследовании опасных био-физико-химических явлений, имеющих большое значение для экологического менеджмента; при картировании и поиске различных объектов в теле золоотвалов, в частности, туго плавкого полимерного материала – микросфер [Манштейн и др., 2015]. Востребованы и распространены работы по изучению хвостохранилищ и отвалов [Оленченко и др., 2016], например, с целью понимания механизмов миграции и осаждения химических элементов внутри тела отходов и их выноса за пределы техногенной системы [Эпов и др., 2017].

С помощью метода электротомографии решаются гидрогеологические задачи регионального и локального масштабов [Faguet A., Sanchaa A., 2018], исследуются археологические комплексы [Ерохин и др., 2012; Шапаренко и

др., 2016; Балков и др., 2023], курганные могильники и древние захоронения [Эпов и др., 2017; Журбин и др., 2007].

В России развитие метода электротомографии началось немного позже, чем за рубежом. Первые работы связаны с представителями московской школы электроразведки. В одной из первых работ авторы описывают новые подходы к электрическим зондированиям [Бобачев и др., 1995]. Далее, развивая собственные исследования, авторы опубликовали работу [Бобачев, Модин, Перваго, 1996], в которой анонсируют установки и методики многоэлектродных исследований, характеризуют влияние приповерхностных неоднородностей, способы решения обратной задачи, а также приводят некоторые примеры интерпретации данных. Весомый вклад в развитие метода ЭТ внесли и другие работы группы исследователей из МГУ [Павлова А.М., Шевнин В.А., 2013; Шевнин В.А. и др., 2010; Квон Д.А. и др., 2013; Бобачев А.А., Модин И.Н., 2008; Куликов и др., 2013; Большаков Д.К., Модин И.Н., 2015]. Известны и котируются аппаратные средства, разработанные в ИНГГ СО РАН, такие как Скала 48, 64 [<https://kbelectrometry.ru/>].

В настоящее время в связи с усовершенствованием аппаратуры и программ обработки большое распространение получили псевдо-3D измерения методом электротомографии, при которых используются системы параллельных профилей [Bermejo et al., 2017]. Такой тип съемки применяют, например, при исследовании путей стока подземных вод, так как их характеристика осложняется сильной временной и пространственной неоднородностью [Doetsch et al., 2012]. Также, квази-3D ЭТ используют при изучении археологических памятников [Negri S., Leucci G., Mazzone F., 2008]

Авторы статьи [Павлова, Шевнин, 2013] утверждают, что электротомография является наиболее эффективной технологией метода сопротивлений для детальных структурных исследований. Они использовали методику псевдо-3D с последующей 3D инверсией всего полученного объема данных. По мнению авторов вышеупомянутой статьи, методика псевдо-3D

электротомографии обладает рядом преимуществ относительно 2D профильной съемки. Это возможность исследования трёхмерных сред и получения объемной 3D модели участка исследований; относительно высокая производительность и возможность использовать для измерений 2D аппаратуру; подавление артефактов инверсии, вызванных трёхмерными неоднородностями.

1.2. Опыт применения геофизических методов для исследования разломных зон

В этом разделе рассматривается общемировой опыт работ методом ЭТ при изучении сложно-построенных территорий с присутствием разломных структур. Конечно, в первую очередь следует привести важные определения. Ведущий специалист в области структурной геологии и тектонофизики д.г.-м.н. Семинский К.Ж. трактует этот термин наиболее полно. В его понимании разломная зона - объемный деформационный элемент, отличающийся от окружающего пространства, внутренняя структура которого характеризуется совокупностью нескольких структурных элементов, содержит магистральный сместитель и разрывы 2-го порядка - опережающие, оперяющие и сопутствующие [Семинский, 2003]. Такая трактовка интересна ещё и тем, что авторами выделяются опережающие разрывы, которые могут вызывать геофизические предвестники последующего глобального разрушения.

Для выяснения строения участков с разломами используются целый ряд геофизическими методов, из сейсмических, например, гидроакустика [Smith et al., 2002], метод сейсмической рефракции [Schutze et al., 2012]; применяют георадиолокацию, радиомагнитотеллурическое зондирование (PMT) и относительно новую его модификацию с контролируемым источником – PMT К [Shlykov et al., 2019].

В мировой практике и в России электротомография привлечена для изучения параметров разломных структур относительно недавно. В работе [Ramachandran et. al., 2012] описывается исследование зоны разлома методом

ЭТ. В результате интерпретации данных уточнена геометрия уже известного разломного нарушения и объяснено каким образом трещины и разломы влияют на течение грунтовых вод. Кроме того, авторы обнаружили целую систему разломов, простирающуюся с севера на юг вблизи поверхности участка, т.е. им удалось существенно дополнить знания о строении. Авторы работы [Musa et al., 2023] проводили измерения ЭТ в месте недавнего разлома, вышедшего на поверхность после землетрясения. По результатам интерпретации им удалось проследить продолжение разлома в глубину.

Существуют публикации, когда строение участков исследования ещё более сложное. Например, в работе [C. Gelis et al., 2016], приведен разрез с разломной зоной по данным ЭТ (Рисунок 3). По имеющимся геолого-геофизическим данным авторы выделили различные геологические объекты и зону разломного нарушения с пониженными значениями УЭС. Понятно, что для столь детального расчленения разреза потребовалось привлечение очень представительных геологических данных.

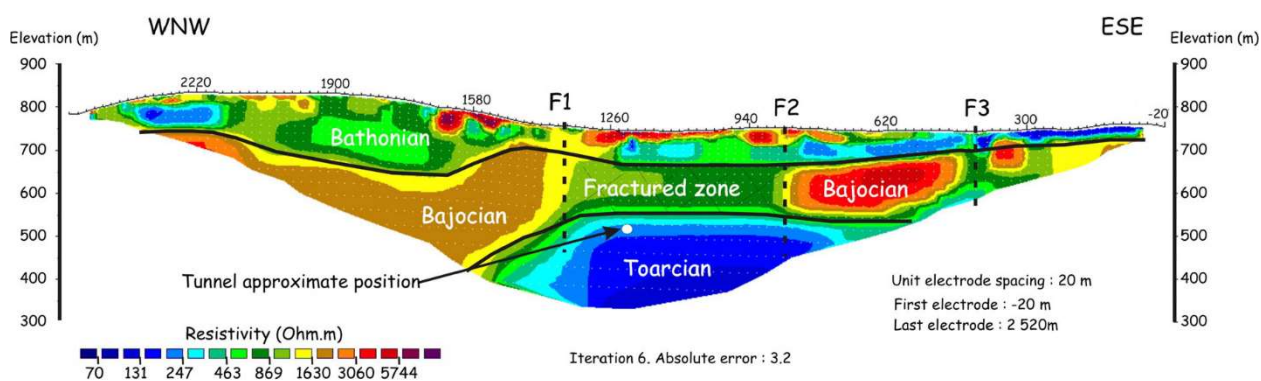


Рисунок 3 - Геоэлектрический разрез по данным электротомографии [C. Gelis et al., 2016].

Можно отметить, что в последнее время увеличилось число как российских, так и зарубежных работ по исследованию разломных структур методом ЭТ [Barnes et al., 2021; Albuquerque et al., 2022; Arjwech R. et al., 2024].

Например, с помощью комплекса методов малоглубинной сейсморазведки и электротомографии в работе [Ермаков и др., 2017]

представлено строение тектонических разломов в Южной Якутии. Разрабатываются и применяются новые подходы к интерпретации данных ЭТ при изучении разломных структур. Авторы работы [Семинский, Зарипов, Оленченко, 2016] учитывают представления тектонофизики о стадийности разломообразования, предопределяющей закономерное существование в породном массиве разных уровней нарушенности горных пород (Рисунок 4).

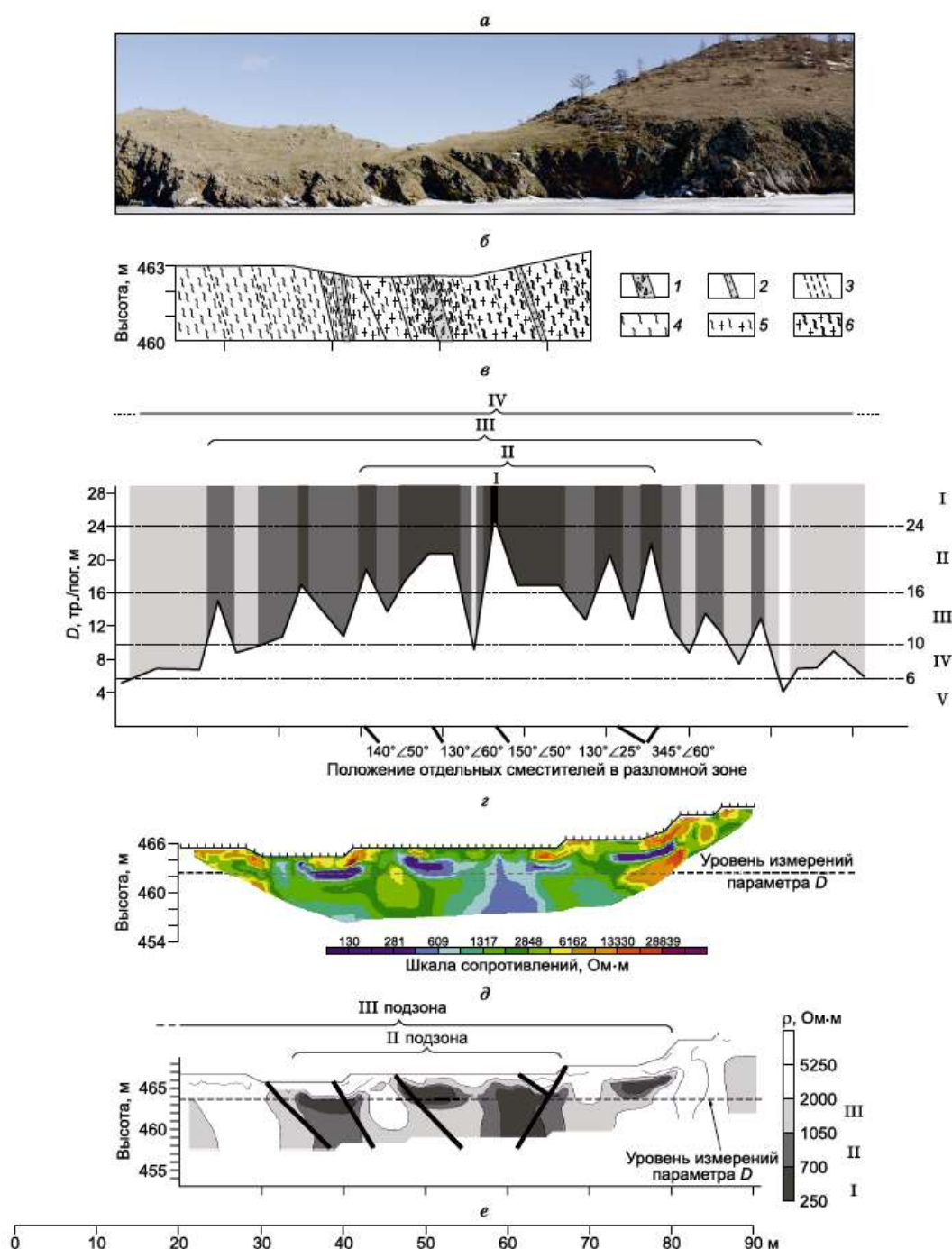


Рисунок 4. Результаты применения тектонофизического подхода к обработке геолого-структурных и электротомографических данных, полученных для

профиля, пересекающего эталонную разломную зону м. Онтхой в Приольхонье (Западное Прибайкалье) [Семинский, Зарипов, Оленченко, 2016].

а — фотография разломной зоны м. Онтхой, проявляющейся серией волноприбойных ниш и ложбиной в рельефе. б — геолого-структурный разрез, построенный по результатам изучения фрагмента берегового обрыва на м. Онтхой: 1, 2 — сместители, представленные брекчией дробления (1) или глиной трения (2); 3 — интенсивно трещиноватые участки коренного выхода; 4 — гнейсы; 5 — гранитогнейсы; 6 — древние милониты. в — вариации вдоль профиля значений плотности трещин в 1 пог. м (D). На графике оттенками серого и черным цветом выделены участки, для которых степень нарушенности пород трещинами превышает четыре выделенных статистическим способом предела параметра D (штриховые линии). Скобки над графиком — генерализованные границы фрагментов массива, которые по нарушенности трещинами относятся к I, II, III, IV или V уровням, выделенным согласно результатам анализа распределений параметра D ; под графиком — положение и элементы залегания составляющих зону разломных сместителей. г, д — геоэлектрические разрезы, построенные по данным ЭТ вдоль профиля над береговым обрывом м. Онтхой со стандартным набором изолиний (г), а также с изолиниями, проведенными по значениям ρ (д), выделенным при статистической обработке массива данных. Скобки над графиком — генерализованные границы фрагментов массива, которые по электропроводности относятся к II и III уровням, выделенным согласно результатам анализа распределений параметра ρ ; черные линии — предполагаемое положение разломных сместителей. е — отметки расстояния вдоль профиля (для рис. б—д).

Уровни выявляются посредством статистического анализа величин удельного электрического сопротивления, что позволяет выделять на геоэлектрическом разрезе границы разломной зоны в целом и ее внутренние подзоны, связанные с формированием главного сместителя и 8 разрывов 2-го порядка (см. Рисунок 4). Этот результат с привлечением метода электротомографии фактически подтверждает на практике определение д.г.-м.н. К. Ж Семинским термина разломная структура.

К настоящему времени накоплен значительный опыт применения электромагнитных методов постоянного и переменного тока для исследования разломных зон Горного Алтая [Деев и др., 2012; Неведрова и др., 2017; Nevedrova et al., 2019]. В работе [Неведрова, Пономарев, Деев, 2017] по данным ВЭЗ и ЗСБ получены глубины до кровли фундамента и построены геоэлектрические разрезы осадочного чехла алтайских впадин (Чуйской

Курайской, Уймонской), выделены предполагаемые разломы. Авторы рассматривают строение осадочного заполнения и фундамента крупных межгорных впадин как разломно-блоковое [Неведрова и др., 2016; Санчаа, Неведрова, Пономарев, 2019].

Преимущество метода ЭТ основано на большой плотности данных, что обуславливает высокую детальность и позволяет уточнить геоэлектрические характеристики верхней части разреза, получить интервал значений УЭС и геометрию разломной зоны.

1.3. Определение условий образования и развития природных карстово-суффозионных процессов с привлечением геофизических методов

Карст – геологический процесс растворения или выщелачивания поверхностными и подземными водами водорастворимых горных пород с образованием отрицательных форм в рельефе и пустот на глубине. Наиболее распространенные породы, в которых развивается карст: доломиты, гипс, ангидрит, соли. По условиям залегания различают открытый карст, когда карстующиеся породы выходят на поверхность, и закрытый карст – карстующиеся породы перекрыты сверху нерастворимыми породами. Поверхностные формы карста представлены каррами, понорами, карстовыми воронками, котловинами, подземные – карстовыми каналами, шахтами и пещерами и пр. В пещерах формируются сталактиты и сталагмиты.

Под суффозией (от лат. *suffossio* — подкапывание, подрывание) понимают процесс, при котором горные породы в течении длительного времени насыщаются поверхностными и подземными водами, при этом происходит вынос мелких минеральных частиц из нерастворимых горных пород. Кроме того, может присутствовать и выщелачивание растворимых компонент породы водой, фильтрующейся через толщу рыхлых отложений. Этот процесс вызывает оседание всех вышележащих пород с образованием на земной поверхности мелких и крупных замкнутых понижений (блюдец, западин, воронок, провалов и т.п.) диаметром до 10, реже до 100—500 м. Возникновение и развитие суффозионных образований относят к одному из

видов опасных геологических процессов [Аникеев, 2006]. Суффозия часто сопровождает карстовые процессы в закрытом типе карста, формируя карстово-суффозионные воронки и провалы. В работе [M. Xiao, N. Shwiyhat, 2012] проведены эксперименты в лабораторных условиях и показано, что суффозия приводит к изменению проницаемости, ухудшению прочностных характеристик, а также может способствовать просадке грунта.

Существует большой опыт исследования карстовых зон геофизическими методами. Авторы работы [K. Chalikakis et al., 2011] основываются на обширном анализе опубликованных научных результатов по исследованию карстовых областей геофизическими методами. Они отмечают использование георадарной съёмки [Artugyan et al., 2020; Caselle et al., 2020]; сейсморазведки методами преломленных волн, общей глубинной точки и вертикального сейсмического профилирования [Сергеев и др., 2016].

В последние 10-15 лет для поиска и определения зон провалов, связанных с карстами, зачастую привлекают электротомографию [B. Redhaounia et al., 2016; Bermejo et al., 2016; R. Valois et al., 2011]. В каждой из этих публикаций авторы методом электротомографии исследуют пустые полости разного происхождения. Например, в работе [B. Redhaounia et al., 2016] коллектив авторов занимался поиском карстовых полостей в карбонатном бассейне. По результатам проделанной работы им удалось уточнить местоположение полости и более подробно описать геологические характеристики среды вокруг аномального объекта, УЭС которого составляет порядка 200 Ом·м (Рисунок 5).

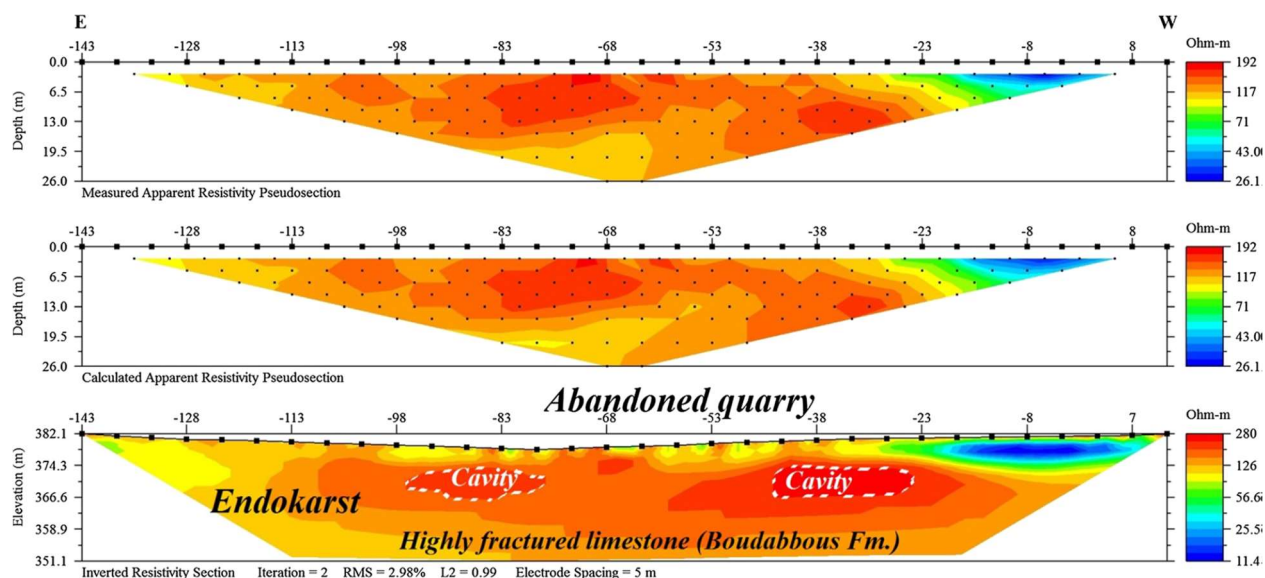


Рисунок 5 - Результаты обработки данных электротомографии с установкой Веннера вдоль одного из профилей на заброшенном карьере [B. Redhaounia et al., 2016].

В других публикациях [Bermejo et al., 2016; R. Valois et al., 2011] показано, что карстовые зоны выделяются повышенным значением УЭС. Эта информация была использована при проведении полевых работ на территории с карстовыми воронками и последующем моделировании ситуации в районе нефтегазоконденсатной залежи в Прикаспийской впадине.

Развитие карстово-суффозионных процессов представляет опасность для зданий и сооружений жилой инфраструктуры, промышленных объектов и пр. С другой стороны, закарстованные породы являются хорошими коллекторами подземных вод, нефти и др. [Короновский Н.В. Общая геология: учебник. М.: КДУ, 2006. – 528 с.] Поэтому исследования причин образования и проявления карстовых процессов являются актуальными.

Суффозионный процесс в физических параметрах – это аномальное разуплотнение среды, влияющие на значение электропроводности, в разных по масштабу объемах горных пород. Соответственно результат этих процессов должен проявляться в гравитационном и электрическом полях, что позволяет обосновать использование электроразведки для их изучения.

Учитывая, что развитие суффозии приводит к изменению во времени плотности и электропроводности приповерхностных отложений, появляется

возможность оценивать последовательные стадии развития таких процессов вплоть до возможного образования провалов, воронок и др. путем проведения повторных гравиметрических и электроразведочных работ. Развитие процесса во времени до конца не изучено. В некоторых случаях, образование воронок происходило стремительно из-за влияния паводка, но и длительное воздействие грунтовых вод может приводить к их образованию.

Основным фактором развития суффозии является избыточное увлажнение горных пород, подверженных растворению. Механическая суффозия активно проявляется вблизи поверхности земли при естественном или искусственном изменении гидродинамических условий. Такие изменения возникают на склонах речных долин и берегах водохранилищ при быстром спаде паводковых вод или сбросе лишней воды из водохранилищ, при распашке земель, при орошении сельскохозяйственных угодий.

Основной причиной появления суффозионных процессов является деятельность подземных вод. Приводить к образованию подобных процессов может увеличение скорости потока подземных вод, увеличение их агрессивности по отношению к вмещающей среде, таяние льда, снега, паводки и наводнения.

1.4 Мониторинг геоэлектрических параметров деструктивных участков геофизическими методами

Мониторинг — это регулярные наблюдения для контроля, оценки и прогноза состояния окружающей среды [Лукина, 2002]. В задачи мониторинга входят не только результаты наблюдений - собранные полевые данные, но и их обработка, интерпретация, анализ, выводы. Мониторинг УЭС с помощью ЭТ при дальнейшем развитии методики и аппаратуры может стать одним из способов отслеживания изменения сейсмической активности разломов.

Для геофизического мониторинга широко привлекают сейсмические методы, наблюдают за гравиметрическими, геохимическими, тепловыми полями, используются спутниковые системы наблюдения за деформацией

(GPS, Радар inSar), гидрологический контроль за уровнем, дебитом, температурой воды в скважинах, водоемах.

В регионах повышенной сейсмичности в первую очередь применяется сейсмический мониторинг. Обычно это сеть равномерно распределенных сейсмических датчиков (приемников). Цели данного мониторинга довольно обширны: избежать рисков разрушения зданий и сооружений [Заалишвили и др., 2012], выявить причины, вызывающие геодинамические события региона [Яковлев и др., 2014].

Для мониторинга сейсмических процессов используются и другие геофизические методы, например, магнитотеллурические [Баталева, Баталев, 2015]; слежение за концентрацией почвенного радона [Семинский, Бобров, 2013].

Электромагнитный мониторинг является важной составляющей из-за высокой чувствительности электромагнитных полей к изменениям напряженно – деформированного состояния горных пород.

Различают активный и пассивный электромагнитный мониторинг, при активном поле возбуждается контролируемыми источниками, в пассивном используются методы МТЗ, МВЗ. Так как важно выявить и небольшие временные аномалии электрических характеристик, предпочтение отдается методам с контролируемыми источниками [Светов, 1992]. Эффективность активного мониторинга существенно зависит от размещения пунктов наблюдений, их оптимальной расстановки. Поэтому всегда необходима информация о строении сейсмоактивной зоны, о присутствии разломных структур. Можно отметить, и субъективный фактор: система наблюдений и их периодичность в значительной степени зависит от материальных возможностей.

Обработка данных регулярных наблюдений производится в два этапа. Вначале выполняется оценка качества измерений, создание и пополнение базы полевых данных, пригодных для дальнейшей интерпретации. Второй этап индивидуален для каждого из привлеченных электромагнитных методов,

выполняется одномерная или 2-3D интерпретация в зависимости от выбранной съемки, осуществляется выбор информативных параметров и расчет их вариаций.

Для электромагнитных наблюдений в сейсмоактивных районах проводится совместный анализ параметров сейсмичности и вариаций электромагнитных параметров для установления связи между ними с целью разработки прогнозных критериев. Аномальные электромагнитные вариации могут быть использованы в качестве индикаторов изменения напряженного состояния геологической среды [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

К природным деструктивным явлениям можно отнести землетрясения, приводящие к разломам геологической среды, оползням, карстовые, суффозионные процессы, изменения в криолитозоне Земли, горные удары, угрожающие безопасности шахтеров и пр. [Великин, 2019]. В настоящее время можно видеть, что постоянно возрастает техногенная нагрузка на геологическую среду и соответственно востребованность регулярных наблюдений в зонах природных и природно-техногенных опасных процессов.

Относительно прогнозирования землетрясений существует значительное число научных работ. В основном они делятся на два типа. В одних рассматриваются возможные теоретические модели процессов подготовки землетрясений на основе механики деформируемого твёрдого тела и физики разрушения горных пород [Журков, 1981; Киссин, 2013; Родкин, 2020]. В других анализируются возможные предвестники опасных явлений [Гохберг и др., 1982; Добровольский, 2010]. В частности, актуально определение, которое приведено в работе д.ф.-м.н. Добровольского И.П. относительно землетрясений: «...предвестники землетрясения представляют собой вариации геофизических полей, вызванные процессом подготовки землетрясения, сопровождающие и отражающие именно этот процесс».

В работе [F. Martínez-García et al., 2015] исследовали вариации проводимости воды перед землетрясением с использованием погружаемого измерителя проводимости. Авторы этой статьи показывают, что существует

корреляция между атипичными вариациями проводимости воды и сейсмическими событиями. Имеются публикации о проведении ежегодного мониторинга той или иной зоны нарушения, либо об измерениях в местах проявления сейсмических событий с целью уточнения геологического строения приразломной зоны [Rizzo, 2009]. Привлекают внимание работы иностранных ученых на тему «time-lapse ERT», то есть исследования изменения УЭС во времени с использованием метода ЭТ. Например, в работе [Larenna, 2023] представлены результаты изменений во времени уровня грунтовых вод в теле оползня.

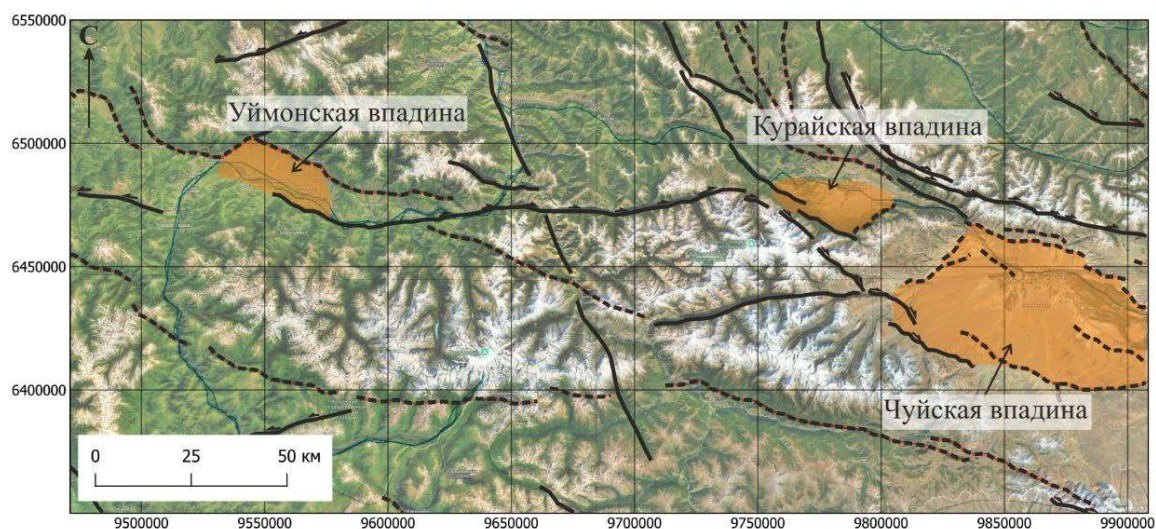
Мониторинг геоэлектрических параметров разломных структур Горного Алтая проводится в ИНГГ СО РАН с 2004-го года. В качестве инструмента используются электромагнитные методы с контролируемыми источниками - вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и зондирование становлением поля (ЗСБ) в нескольких модификациях. По данным метода ЗСБ при анализе вариаций УЭС и коэффициента электрической анизотропии установлено, что их изменения отражают продолжающийся афтершоковый процесс разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7,3$), текущую сейсмичность и опосредованно процесс восстановления геологической среды после разрушительного события [Неведрова, Шалагинов, 2015].

Кроме того, в ИНГГ СО РАН проводится электромагнитный мониторинг методом магнитотеллурических зондирований (МТЗ). Согласно работе [Потапов, Поспеева, 2017] мониторинг МТЗ позволяет выявить различия между кривыми кажущегося сопротивления и геоэлектрическими моделями, полученными в разные годы наблюдений. Авторы связывают эти существенные различия с изменением сейсмической активности территории.

Глава 2. Геоэлектрическое строение и мониторинг зон деструкции по данным метода электротомографии в районе Горного Алтая

Современный облик Горного Алтая сформирован сложной системой активных разломов кайнозойского возраста. Для региона характерно чередование вытянутых хребтов и высокогорных плато с межгорными впадинами, которые в основном приурочены к долинам крупных рек. Тектонические нарушения создают блоковую структуру земной коры на всей территории. Наибольший интерес для геоморфологического изучения представляют крупные кайнозойские разломы по границам впадин: они отличаются значительной амплитудой смещений и отчетливо выражены в рельефе.

Внутриблоковые разломные зоны и разломы в области перехода от горного обрамления к осадочному заполнению в крупных алтайских впадинах (Чуйской, Курайской, Уймонской) часто перекрыты современными отложениями, и определить их строение методами геокартирования затруднительно (Рисунок 6). Разломы, образовавшиеся при надвигании горного обрамления на осадочные породы впадин, не всегда выражены в рельефе.



Условные обозначения:



Рисунок 6 – Размещение крупных впадин и современные активные разломы Горного Алтая по геологическим данным. [http://neotec.ginras.ru/index/datamap/AFEAD_M45_Map.html].

По геологической классификации разломных нарушений в районе Горного Алтая доминируют взбросы и сдвиги из-за преобладающего общего сжатия региона. Присутствуют также надвиги, которые образуются в обстановке сжатия одновременно со складчатостью, и сбросы в зонах растяжения. По морфотектоническим и скважинным данным установлено, что вертикальное падение плоскостей сместителей характерно для сбросов и сдвигов, а для взбросов они могут быть наклонными, причем под разными углами [Новиков, 2003; Новиков и Поспеева, 2017]. Таким образом, разломные зоны могут быть как с вертикальными, так и с наклонными границами [Шапаренко и др., 2023].

Для получения более полных сведений о строении на глубине разломных структур, особенно перекрытых осадками, привлекают геофизические методы, главным образом сейсмические и электромагнитные.

Начало работ методами постоянного и переменного тока в Горном Алтае

было инициировано разрушительным Чуйским землетрясением 2003 г. с магнитудой 7.3. Эпицентр находился в горной перемычке между Чуйской и Курайской впадинами. Эпицентральная зона захватила территории обеих впадин. Максимальные нарушения в виде многочисленных трещин, рвов, грязевых вулканчиков наблюдались в западной части Чуйской впадины, в долине р. Чаган и в районах пос. Ортолык, Мухор-Тархата, где и были начаты полевые работы комплексом методов электроразведки. Вначале привлекались глубинные модификации – зондирования становлением электромагнитного поля и вертикальные электрические зондирования. Уточнялось строение участков в Чуйской впадине, и практически параллельно проводился мониторинг геоэлектрических параметров горных пород.

Измерения методом электротомографии выполняются с 2012 года вначале в Чуйской, а затем в Курайской и Уймонской впадинах. Первоначальной целью этих работ было изучить возможности метода для определения строения отдельных участков, на территории которых предполагалось присутствие разломных зон по геологическим и электромагнитным данным методов ЗСБ и ВЭЗ. Учитывая высокую детальность метода ЭТ и развитые способы интерпретации данных, получены двумерные геоэлектрические модели поисковых объектов и определены такие характеристики как геометрические размеры, интервалы удельного электрического сопротивления разломной структуры. При этом отрабатывалась методика измерений: выбор направления профиля, установки, шаг между электродами.

2.1. Возможности метода электротомографии при построении моделей разломных зон. Результаты интерпретации

2.1.1 Чуйская впадина

Чуйская впадина, расположенная в юго-восточной части Горного Алтая, является наиболее крупной из аналогичных структур. Она выполнена комплексом континентальных отложений, с мощностью, достигающей 1000 м в её северной и центральной частях по данным нестационарных электромагнитных зондирований [Девяткин, 1981; Неведрова и др., 2001].

Измерения методом электротомографии осуществляются на двух участках впадины – в долине р. Чаган и в районе поселка Мухор - Тархата (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Участки работ методами электроразведки на фрагменте геологической карты Чуйской впадины Горного Алтая.

Долина реки Чаган

По геологическим данным долина р. Чаган – ящикообразный грабен с максимальной мощностью осадков до 300-400 м по данным ВЭЗ и ЗСБ, ограниченный с северо-запада и юго-востока разломами. Причем северо-западный разлом хорошо выражен в рельефе, открытый разрез кайнозойских отложений в этом месте известен как эталонный, характеризующий осадочные породы всего Горного Алтая [Русанов, 2011].

Долина находится всего в 20 км от эпицентра Чуйского землетрясения, и здесь ярко проявились его разрушительные последствия. Магистральный разрыв частично вышел на земную поверхность, образовав многочисленные сейсмодислокации, уже имеющиеся разломные зоны активизировались. В долине реки Чаган проведены измерения по ряду профилей ЭТ (Рисунок 8).

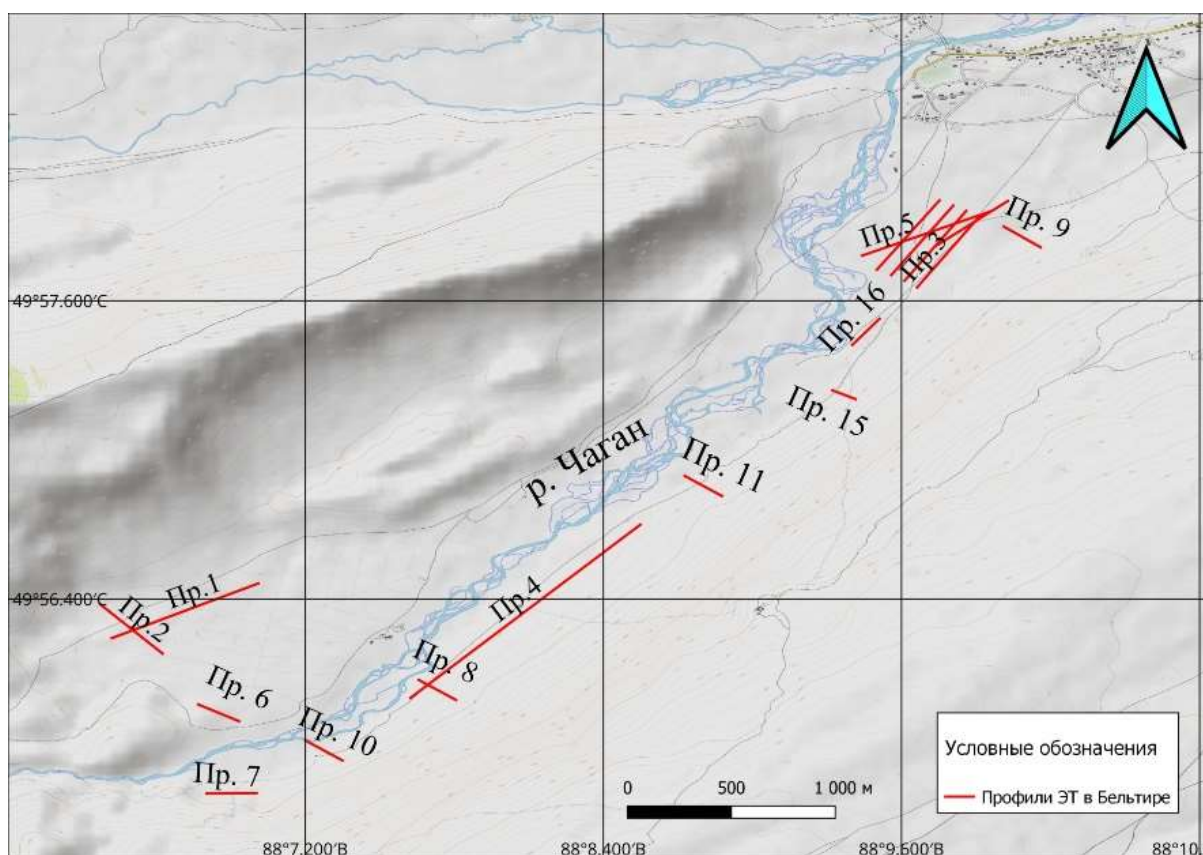


Рисунок 8 – Схема измерений ЭТ в долине р. Чаган (западная часть Чуйской впадины).

Первые результаты, полученные в долине реки Чаган, показали, что по данным метода электротомографии хорошо выделяются разломные структуры этой территории. Для примера рассмотрим разрезы по профилям ЭТ, выполненным вкрест разлома юго-восточного борта долины (Рисунок 9, 10). При измерениях использовалась установка Шлюмберже, длина профиля 235 м. Инверсия производилась с помощью программы Res2DInv [Loke and Barker, 1996].

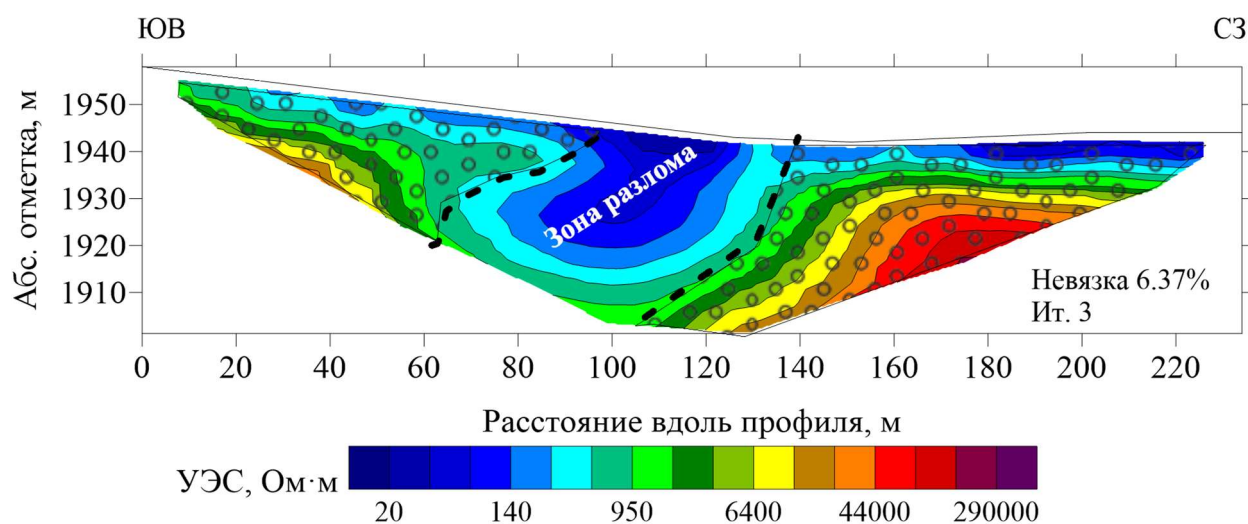


Рисунок 9 – Геоэлектрический разрез по данным ЭТ по профилю 9. Пунктирными линиями ограничена предполагаемая зона разлома.

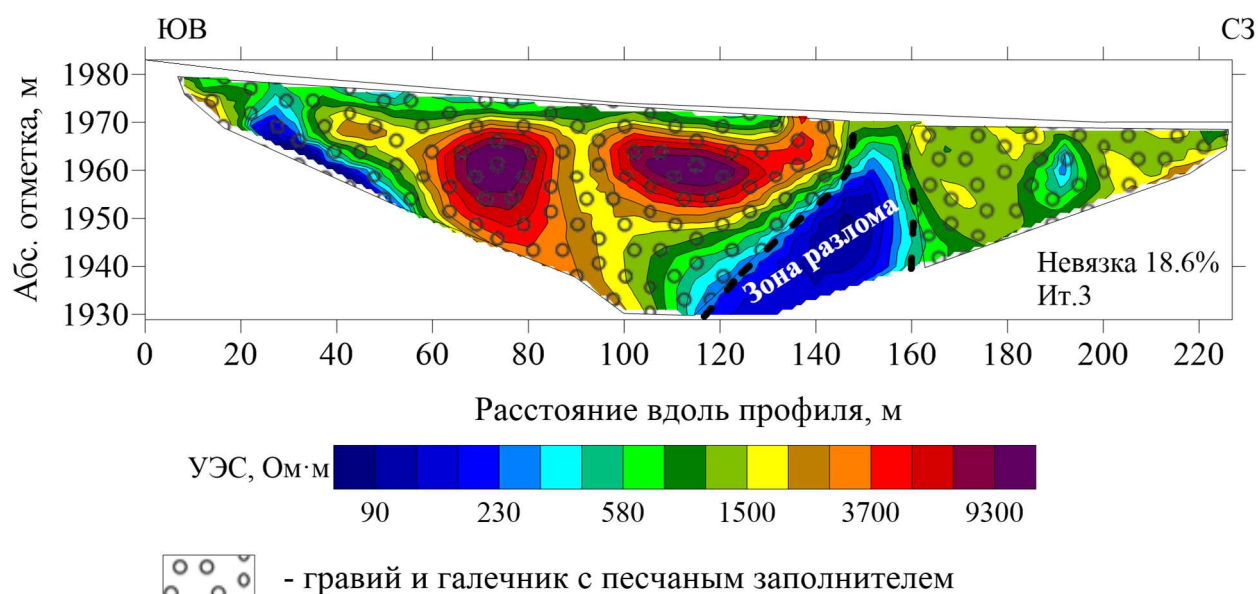


Рисунок 10 – Геоэлектрический разрез по данным ЭТ по профилю 10. Пунктирными линиями ограничена предполагаемая зона разлома.

На обоих разрезах разломная зона выделяется областью пониженных значений УЭС относительно вмещающих более высокоомных пород. Таким образом, результаты по данным электротомографии позволяют выделить зоны разлома и обосновывают предположение, что правый борт долины р. Чаган имеет разломное ограничение.

Следующий разрез по данным ЭТ получен на севере долины по профилю 5, также проложенному вкрест предполагаемого субширотного разлома, ранее выделенного по результатам ВЭЗ и геологическим данным. Длина профиля 5

составляет 800 м. Он выполнен с трёхэлектродной установкой между пунктами ВЭЗ № 34 – ВЭЗ № 19-20 (крестовый) и находится в зоне развития многолетней мерзлоты, УЭС которой достигает 8000 Ом·м и более.

Сопоставление разрезов ВЭЗ и ЭТ наглядно показывает преимущества метода электротомографии, демонстрируя, в первую очередь, более его высокую разрешающую способность (Рисунок 11).

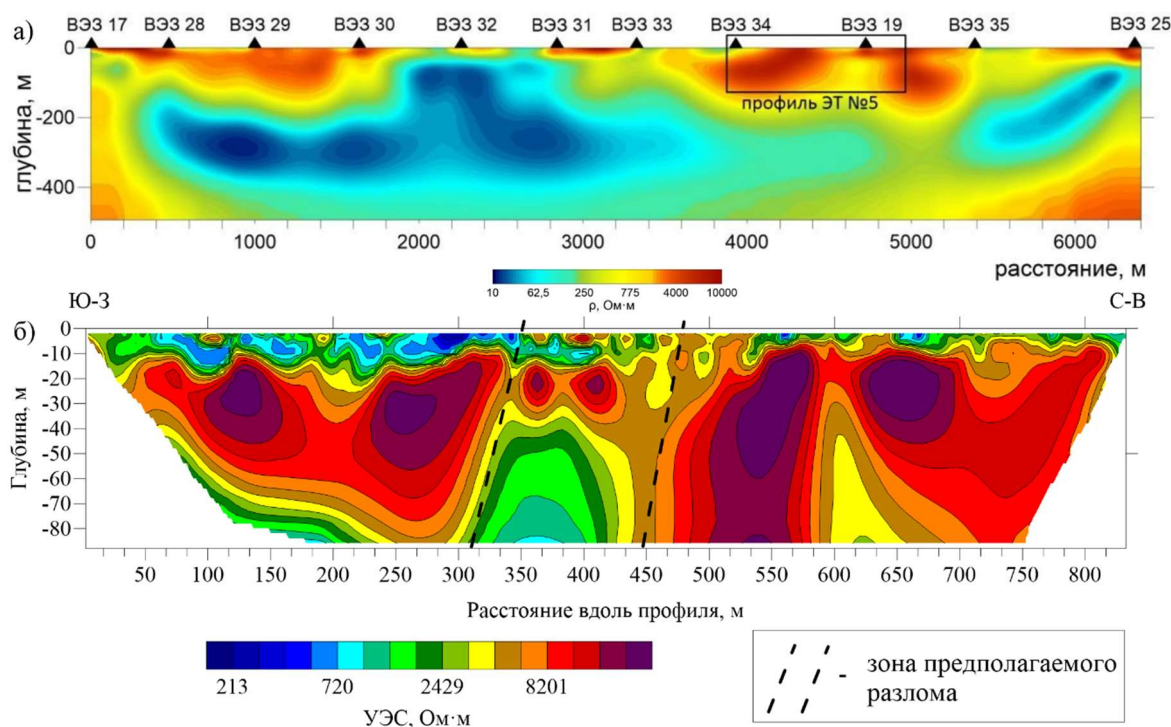


Рисунок 11 – Геоэлектрические разрезы по данным методов ВЭЗ (а) и по профилю ЭТ (б).

Ранее по данным ВЭЗ построены глубинные геоэлектрические модели осадочной толщи, верхней части фундамента долины р. Чаган и выделены предполагаемые разломные структуры и границы фундамента [Неведрова и др., 2025]. Измерения методом электротомографии выполнены на локальных участках с целью получения детальных приповерхностных характеристик разломных зон: положения и наклона сместителя, интервалов удельного сопротивления, характерных для этих структур.

Участок Мухор-Тархата

Очаговая зона Чуйского землетрясения 2003 г. захватила значительную

часть Чуйской впадины. Поселок Мухор-Тархата находится практически в центре впадины примерно в 30 км от эпицентра. В зоне поселка наблюдаются последствия разрушительного события: многочисленные деформации дневной поверхности, жилых и хозяйственных объектов, а имеющаяся в его окрестности разломная зона явно активизировалась [Достовалова, 2004].

Разлом на этом участке обоснован геологическими данными. На основе анализа цифровой модели рельефа по данным радарной съемки (SRTM) и космоснимков LANDSAT известный геолог д.г.-м.н. Зольников И.Д. разделил территорию Чуйской впадины на несколько крупных геоморфологических сегментов. Граница между двумя из этих сегментов 4 и 5 проходит с севера на юг непосредственно через участок Мухор-Тархата по р. Мухор, что свидетельствует о наличии межблокового разлома (Рисунок 12). Также эта разломная зона выделялась по данным электромагнитных зондирований становлением поля (ЗСБ) [Шалагинов, Неведрова, 2016].

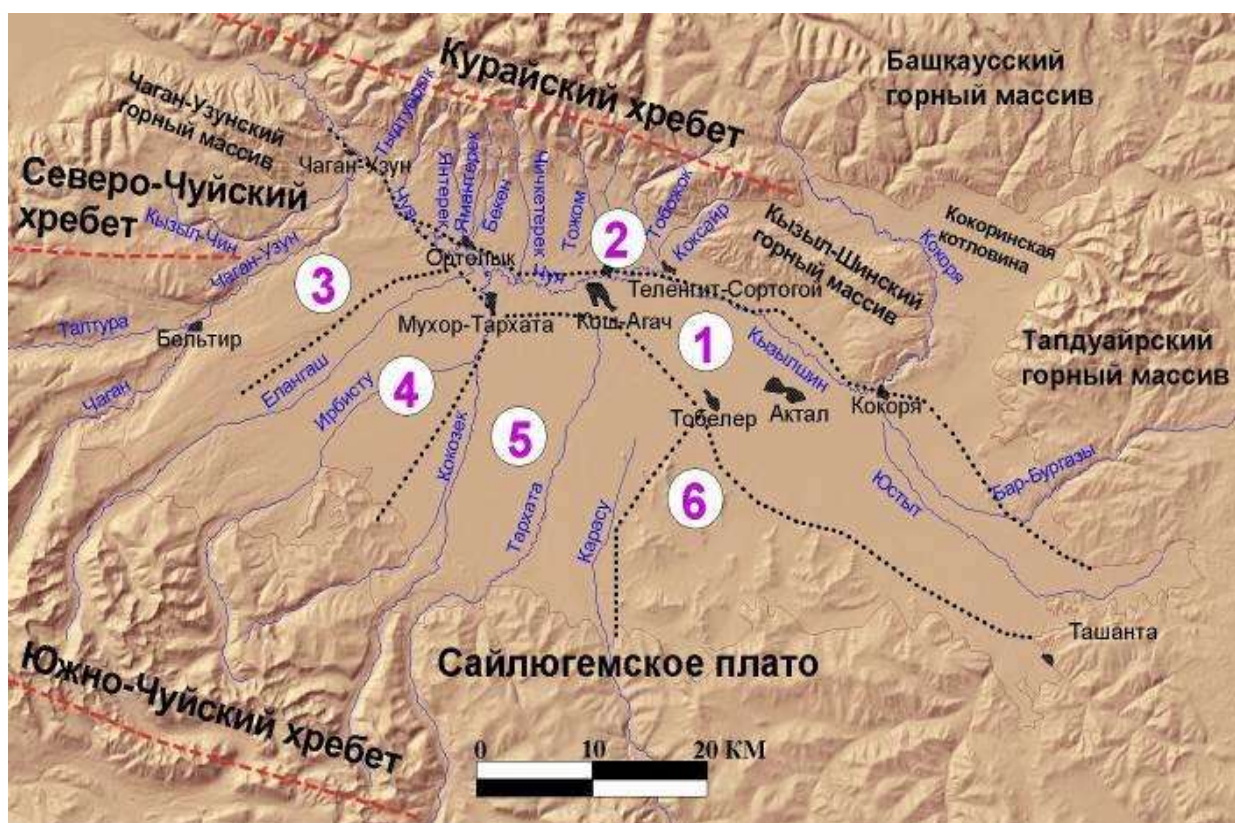


Рисунок 12 - Геоморфологические сегменты Чуйской впадины по данным И.Д. Зольникова [Зольников, 2010].

Объект исследования – разломная зона вблизи поселка Мухор-Тархата. Профили электротомографии расположены в долине реки Мухор, перпендикулярно её течению с запада на восток. Измерения выполнены по 9 профилям. На рисунке 13 показана схема размещения профилей электротомографии на этом участке.

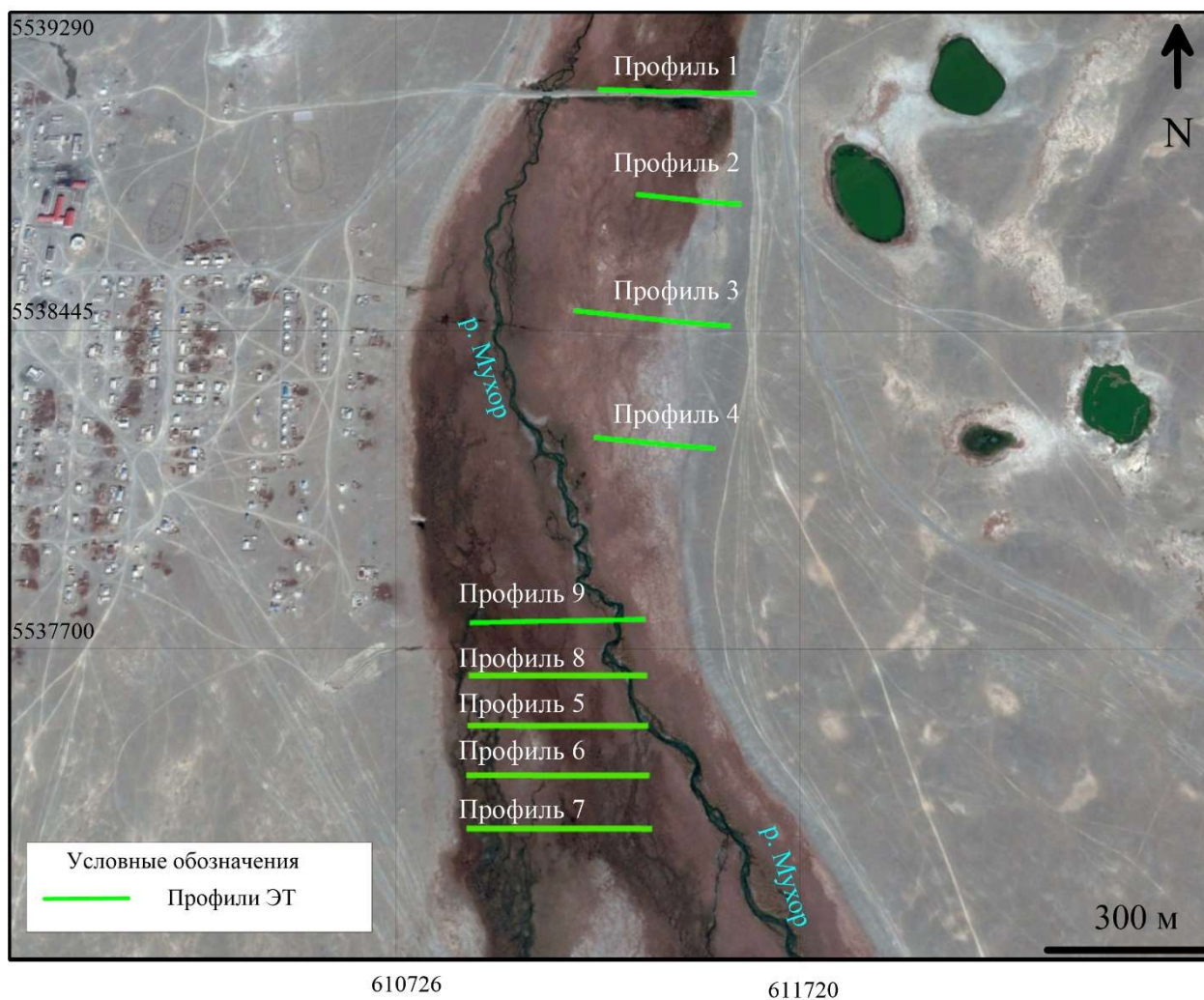


Рисунок 13 - Схема размещения профилей методом электротомографии на участке в районе пос. Мухор-Тархата.

Измерения методом ЭТ по профилям 1, 2, 3 и 4 проведены в 2015 году для выявления строения предполагаемой разломной зоны, а также для выбора места для ежегодных наблюдений. Использовалась установка Шлюмберже с шагом между электродами в 5 м. Расстояние между профилями составило 300 м. Профили 1 и 3 длиной 355 м выполнены с одной нагоняющей расстановкой, а профили 2 и 4 длиной 235 м – с одной стандартной раскладкой.

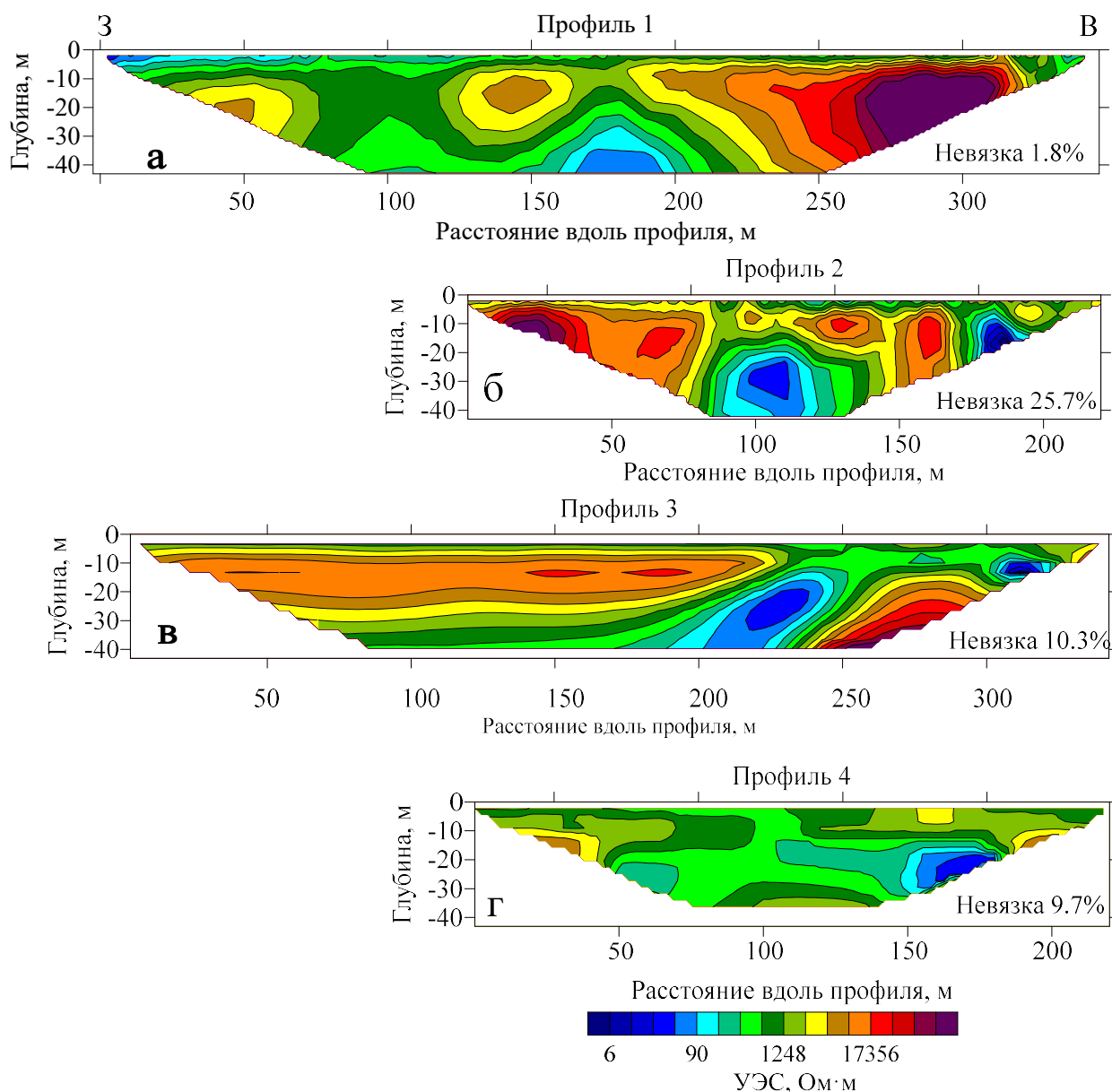


Рисунок 14 – Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии (северная часть участка Мухор-Тархата). Профили 1, 2 – результат инверсии с использованием программы DiInSo, профили 3, 4 – Res2D [Шапаренко, Неведрова, 2024а].

Анализ результатов инверсии данных по профилям 1, 2, 3, 4, расположенным на севере участка, показал, что разломная зона по-разному выделяется на каждом из разрезов по северным профилям (Рисунок 14, а, б, в, г). В дальнейшем для ежегодных мониторинговых наблюдений ЭТ в северной части участка был выбран восточный участок профиля 3, состоящий из одной раскладки, так как разлом здесь проявляется наиболее четко – проводящей наклонной зоной.

Как видно по схеме размещения южных профилей (рисунок 13) часть из них (5, 6 и 9) пересекают реку, в частности, 50 м профиля 9 находится на правом берегу реки.

Далее были построены геоэлектрические разрезы по результатам инверсии с помощью программы Res2DInv по данным ЭТ для всех южных профилей участка Мухор-Тархата (Рисунок 15). Результат инверсии позволяет определить геоэлектрические характеристики разломной структуры.

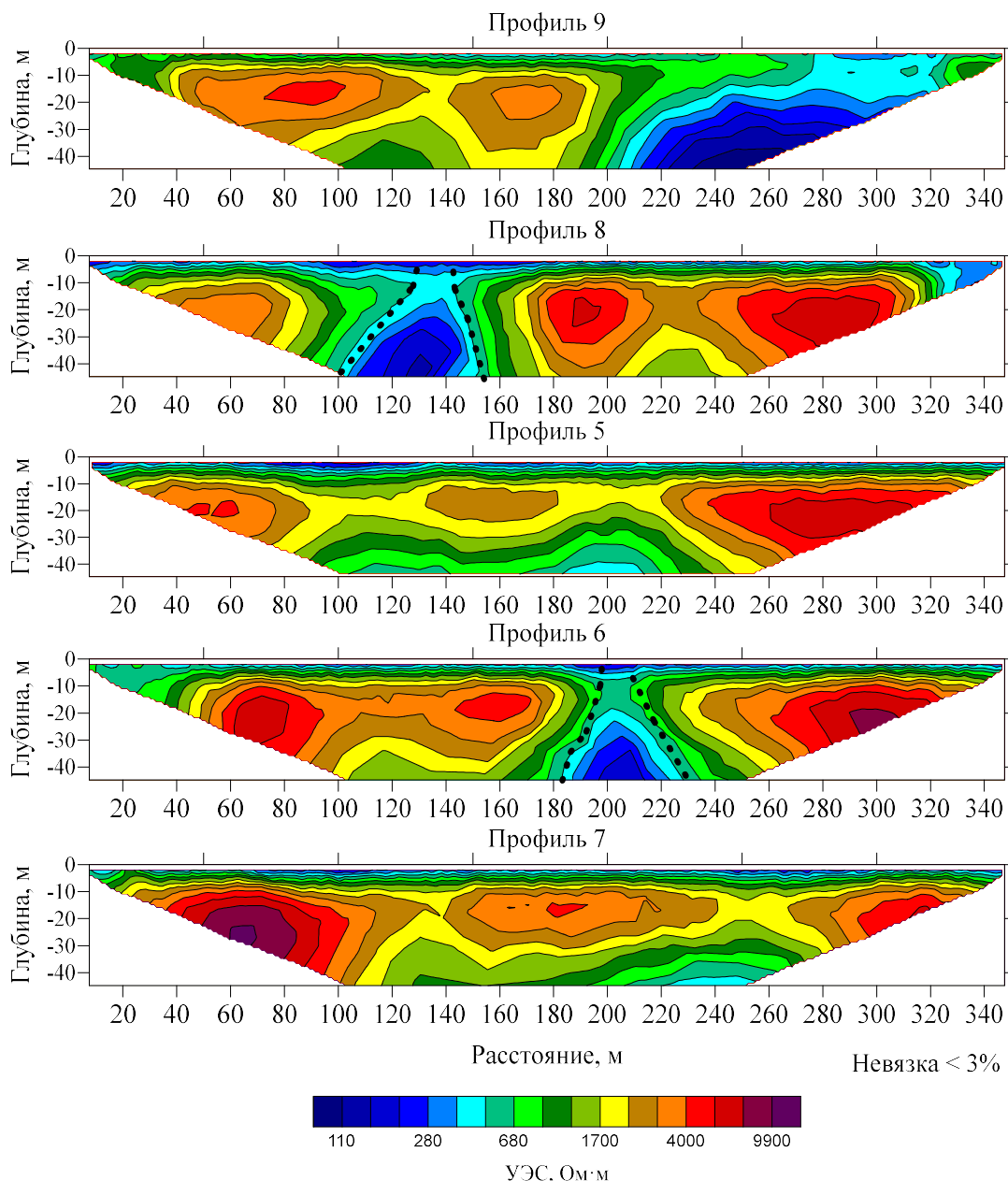


Рисунок 15 - Геоэлектрические разрезы по данным ЭТ в южной части участка Мухор-Тархата (программа DiInSo).

Можно сделать вывод, что разломная зона наблюдается и в южной части участка Мухор-Тархата. Она также проявляется на разрезах по-разному. Особенно хорошо разлом виден на разрезе профиля 8. Южнее (профиль 5) зона перекрыта высокоомными отложениями и хорошо видна только на глубинах более 20 м, а на геоэлектрическом разрезе по профилю 6 в верхней части до глубины в 20 м она сужается [Неведрова, Шапаренко, 2017]. В восточной части разреза по профилю 9 аномалия низких УЭС появляется из-за влияния речного русла.

Для площадного распределения УЭС по территории южного участка, была выполнена 3D инверсия с помощью программы ERTLab по данным, полученным на параллельных профилях 6-9, расстояние между которыми составляет 100 м. На рисунке 16 приведен срез 3D модели на глубине 9 м, на котором выделяются несколько низкоомных аномалий. Практически в центральной части среза на этой глубине разломная зона прослеживается в направлении с юго-запада на северо-восток через весь участок. Низкоомная аномалия в северо-восточной части связана с влиянием реки, так как часть профиля 9 располагалась в её русле.

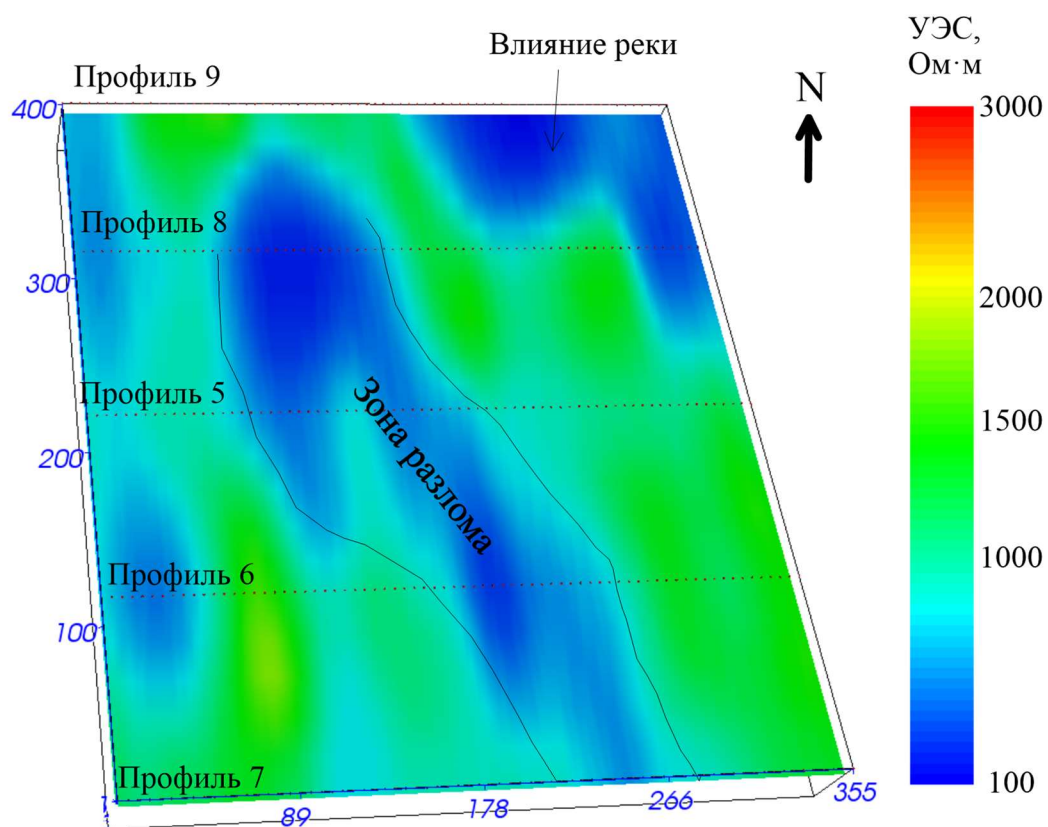


Рисунок 16 - Срез по глубине 9 м трёхмерной модели участка по результатам 3D инверсии данных с использованием программы ERTLab.

Срез на глубине 20 м показан на рисунке 17. Разломная зона также видна, но с более высоким уровнем сопротивлений, при этом её геометрические характеристики в целом соответствуют срезу на глубине 9 м.

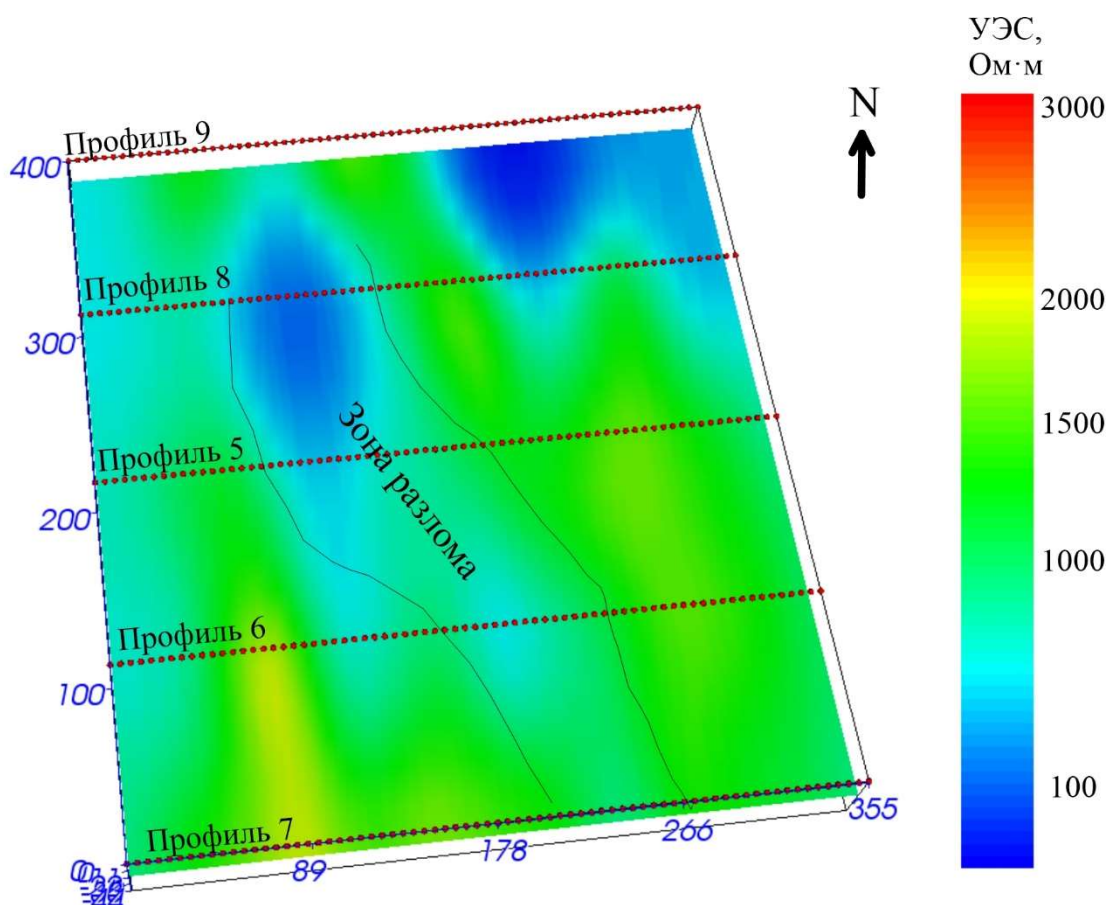


Рисунок 17 - Срез по глубине 20 м трёхмерной модели по результатам 3D инверсии данных с использованием программы ERTLab.

Участок в зоне Курайского разлома

Курайская зона разломов (KFZ) является одной из самых потенциально сейсмоопасных структур Горного Алтая. Исследования с помощью метода электротомографии позволяют проследить разломы в глубину в несколько десятков метров, что невозможно такими методами как тренчинг (~ до 2 м), аэрофотосъемка и анализ космоснимков.

Одним из объектов исследования был участок измерений методом электротомографии на северо-западе Чуйской впадины, расположенный в сегменте 7 разломного уступа Курайского хребта (Рисунок 7). Через этот участок планируется проложить газопровод. Для выяснения строения разломной зоны использовалась аппаратура «Скала-48» с установкой Шлюмберже и шагом 5 м между электродами. По результатам инверсии

данных ЭТ с помощью программы Res2DInv был построен геоэлектрический разрез (Рисунок 18).

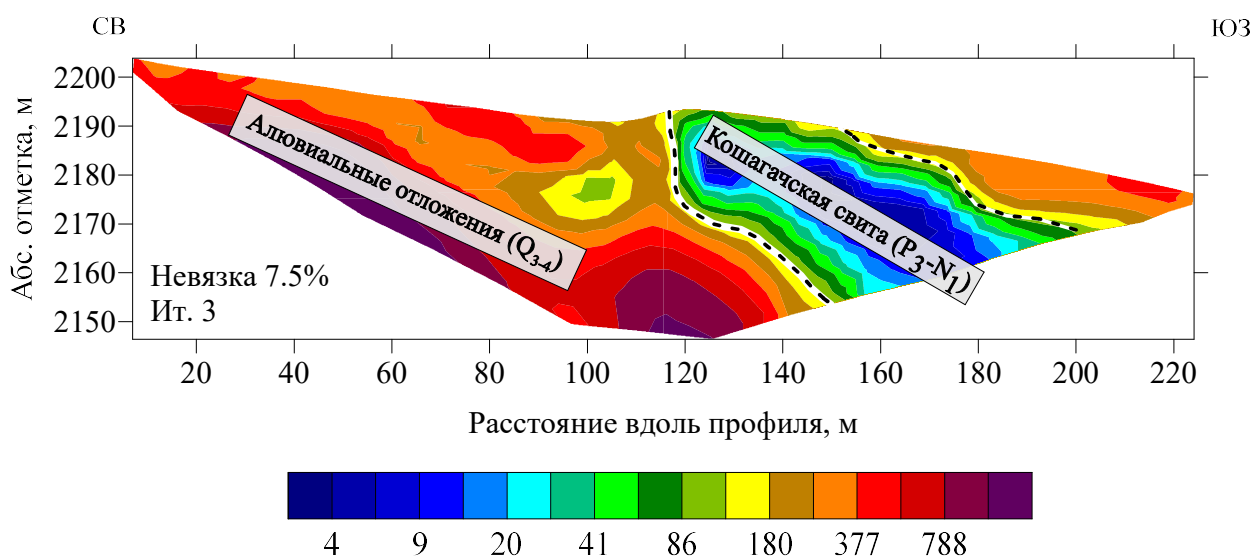


Рисунок 18 - Геоэлектрический разрез с наклонной разломной зоной по данным электротомографии в зоне Курайского разлома (инверсия выполнена с помощью программы Res2DInv) [Turova et al., 2020].

На рисунке 18 видно, что разломная зона в юго-западной части разреза хорошо выделяется наклонной областью с существенно пониженными значениями УЭС относительно вмещающих пород. В области выхода разлома на поверхность геологами была проложена траншея «Чуйская 2» до глубины 2 м. По результатам её изучения определены характеристики обратного разлома, который по данным электротомографии прослеживается до глубины ~ 40 м.

В пройденной траншее «Чуйская 2» установлено, что отложения кош-агачской свиты слагают висячее крыло взброса и надвигаются на пролювиальные верхнечетвертично-голоценовые отложения. Электротомографический профиль выполнен вкост разломного уступа субпараллельно простиранию траншеи. В юго-западной части геоэлектрического разреза выделяется проводящий наклонный объект с низкими значениями УЭС – от 60 до 3 Ом·м. Его можно сопоставить с отложениями кош-агачской свиты. Отложения свиты слагают разломный уступ в соседних сегментах, вскрываются в русле временного водотока и

участвуют в строении оползневых тел, сформированных до образования уступа, а также разрушающих сам уступ. Высокоомные области разреза могут быть сопоставлены с верхнечетвертичными грубообломочными отложениями. Высокоомные отложения как подстилают низкоомные отложения в северо-восточной части профиля, так и перекрывают его на юго-западе. Таким образом, геоэлектрический разрез подтверждает установленный в траншее факт надвигания верхнепалеоген-нижненеогеновых отложений на верхнечетвертичные, со смещением в сторону Курайского хребта [Turova et al., 2020].

2.1.2 Уймонская впадина

Уймонская впадина является одной из крупнейших впадин этого региона, но при этом наименее изучена. Она расположена в долине р. Катунь и протягивается вдоль реки более чем на 35 км при относительно небольшой ширине в 10-12 км. С севера её ограничивает Теректинский хребет, а с юга – Катунский (Рисунок 19).

Актуальность геофизических работ, включая электроразведку, обусловлена необходимостью развития инфраструктуры впадины, в связи с хозяйственными потребностями населения, а также востребованностью туристических направлений. Сведения о строении верхней части осадочного чехла нужны для картирования водоносных горизонтов с целью бурения гидрологических скважин, необходимостью разведки и доразведка месторождений строительных материалов, рудных полезных ископаемых. Впадина относится к территориям высокой сейсмоопасности, поэтому важно выделить сейсмогенерирующих разломных структур для корректного сейсмораионирования.

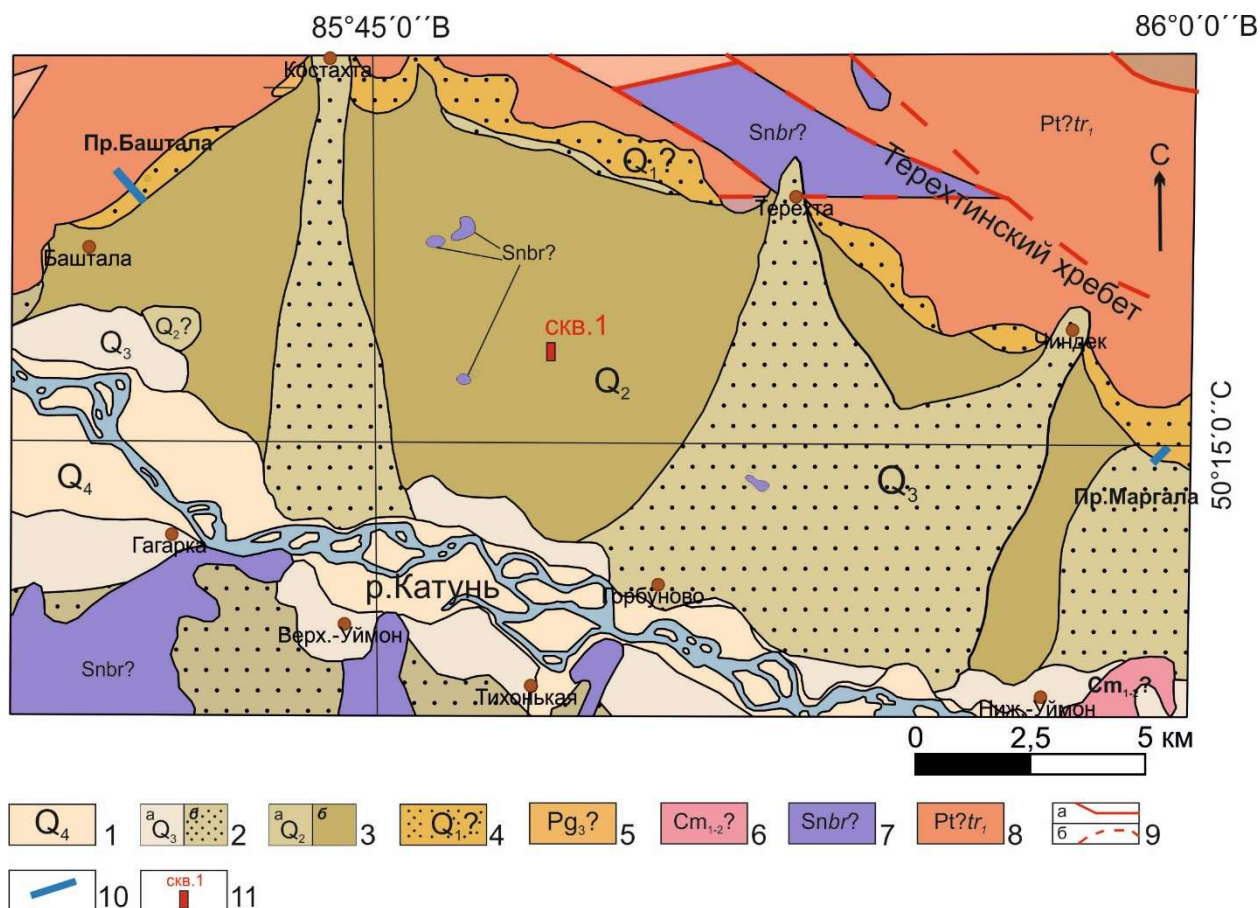


Рисунок 19 – Профили измерений ЭТ по подложке геологической карты Уймонской впадины. 1-современный отдел. Аллювиальные галечники и пески; 2-верхний отдел. Ледниковые валунники и суглинки, водно-ледниковые галечники, аллювиальные галечники и пески, пролювиальные галечники, озерные галечники и гравийные суглинки (а-речные; б-делювиально-пролювиальные); 3-средний отдел. Ледниковые валунники, водно-ледниковые галечники и глины, аллювиальные галечники, пески и глины, озерные галечники, суглинки, пески (а-речные; б-озерно-болотные); 4-нижний отдел(?). Делювиально-пролювиальные суглинки, глины, пески; 5- палеогеновая система. Оligocen(?). Глины; 6- кембрийская система. Нижний-средний отделы (?). Метаморфизованные порфиристы, диабазовые порфиристы, вариолиты и их туфы, филлиты, алевролиты, песчаники, кремнисто-глинистые сланцы; 7- синийский комплекс. Баратальская (?) свита. Метаморфизованные диабазы, порфиристы и их туфы, кварц-полевошпатовые породы, метаморфизованные песчаники, метаморфические сланцы, мраморы, кварциты; 8-

протерозойская группа (?). Теректинская свита, нижняя подсвита. Метаморфические сланцы, сильно метаморфизованные песчаники, мраморы; 9-тектонические контакты: а-достоверные; б-предполагаемые; 10 – профили электротомографии; 11 – скважина №1. [Кузина и др., 2023]

В разрезе Уймонской котловины присутствуют отложения протерозоя, синия, нижнего и среднего палеозоя, кайнозоя. Днище впадины представлено палеозойскими породами теректинской свиты, перекрытой баратальской свитой (вулканогенные метаморфизованные отложения). По геологическим данным в Уймонской впадине имеются перспективы на наличие месторождений полезных ископаемых [Nevedrova et al., 2021]. По данным геологов Теректинский хребет надвигается на отложения впадины.

Опираясь на геологические данные в Уймонской впадине выбраны 2 участка для исследования. Первый участок расположен в северо-западной части впадины в районе поселка Баштала (рисунок 20). Измерения по профилю выполнены на границе с северо-западным горным обрамлением впадины с целью изучения зоны перехода от первых тектонических уступов к осадочному заполнению котловины. По геологическим данным профиль пересекает разломную зону с несколькими тектоническими уступами, выраженными в рельефе [Деев и др., 2012; Санчаа и др., 2019].

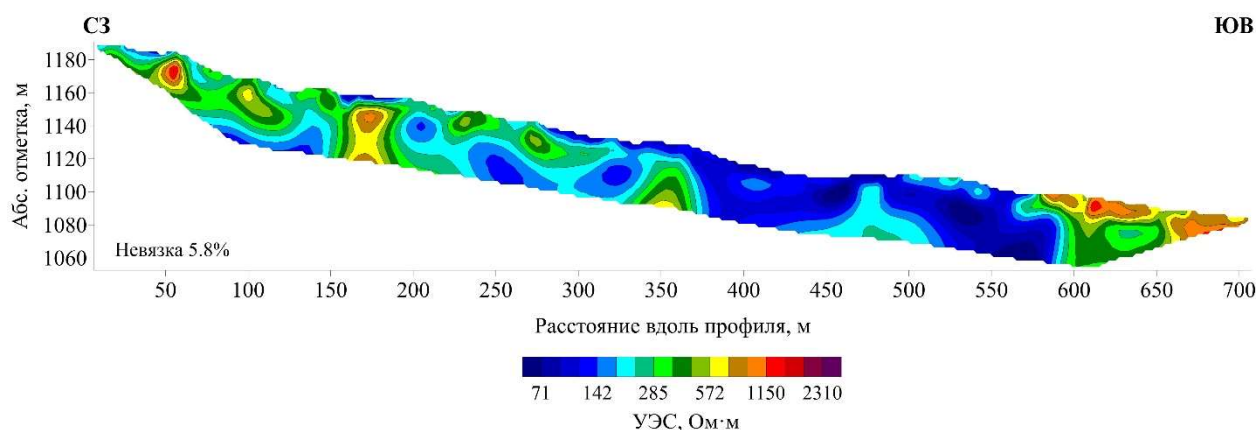


Рисунок 20 – Геоэлектрический разрез по профилю в районе поселка Баштала за 2011 год.

Уступы отражаются в разрезе ЭТ более высокоомными зонами,

низкоомные участки разреза связаны по априорным данным с имеющимися разломными зонами, отчасти обводненными серией мелких источников и родников.

В качестве второго объекта был выбран участок у пос. Маргала, в северо-восточной части впадины, где измерения выполнены по профилю длиной 335 м (рисунок 21). Начало профиля расположено на площадке тектонического уступа, а значительная часть профиля, начиная с отметки в 200 м, проходит по крутопадающему склону к осадкам впадины.

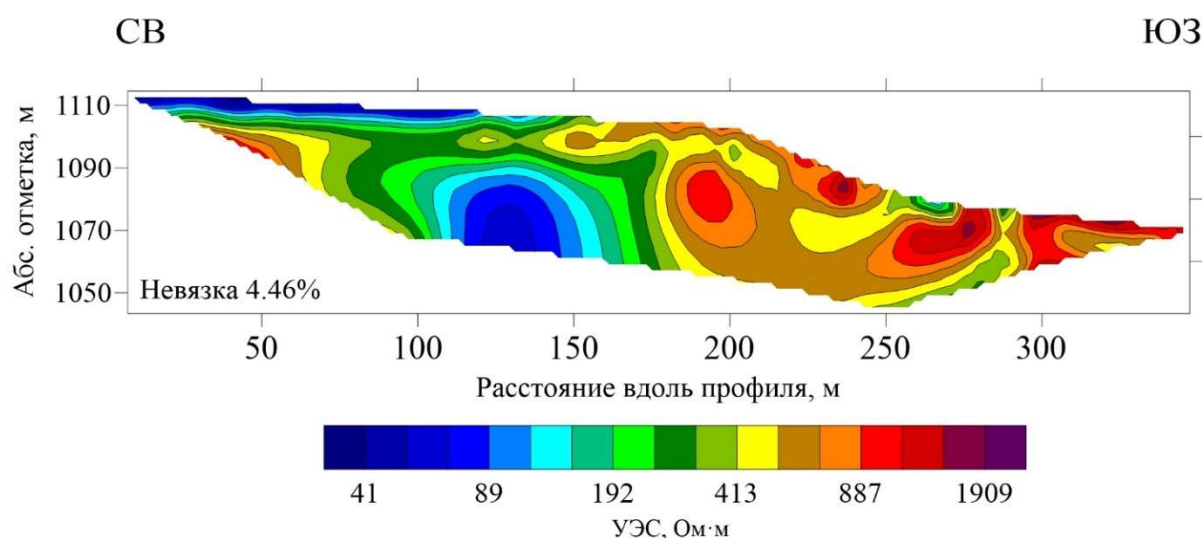


Рисунок 21 – Геоэлектрический разрез по профилю в Маргале за 2011 год.

На отметках по профилю 100-180 м выделяется зона с пониженными значениями УЭС, предположительно трещиноватая [Неведрова, Санчаа, Шапаренко, 2021]. УЭС зоны составило порядка 40 Ом·м.

2.1.3 Курайская впадина

Разломы часто выражаются в рельефе, например, в виде ступенек (уступов). В Курайской впадине такие структуры обнаружены на нескольких участках. При небольшой мощности осадков либо в случаях надежного выделения разлома по нескольким геолого-геофизическими признакам и априорным данным привлекается метод электротомографии.

Разлом, проходящий у подножья уступа в северной части Курайской впадины (Акташский грабен), верифицирован по данным ЭТ. Изначально этот разлом был обоснован геологическими структурными работами и

подтвержден результатами интерпретации данных ВЭЗ.

Поэтому позднее были проведены измерения методом электротомографии через пункты ВЭЗ, вначале по одному профилю. Анализ результатов интерпретации данных ЭТ и ВЭЗ показал их согласование [Nevedrova et al., 2019].

Далее были выполнены площадные измерения ЭТ по системе параллельных профилей. В результате 3D инверсии и визуализации с использованием программного пакета ERTLab представлены вертикальные срезы трехмерной модели этого участка. Разломное нарушение выделяется зоной понижения УЭС до 170 Ом·м относительно вмещающих более высокоомных отложений (Рисунок 22).

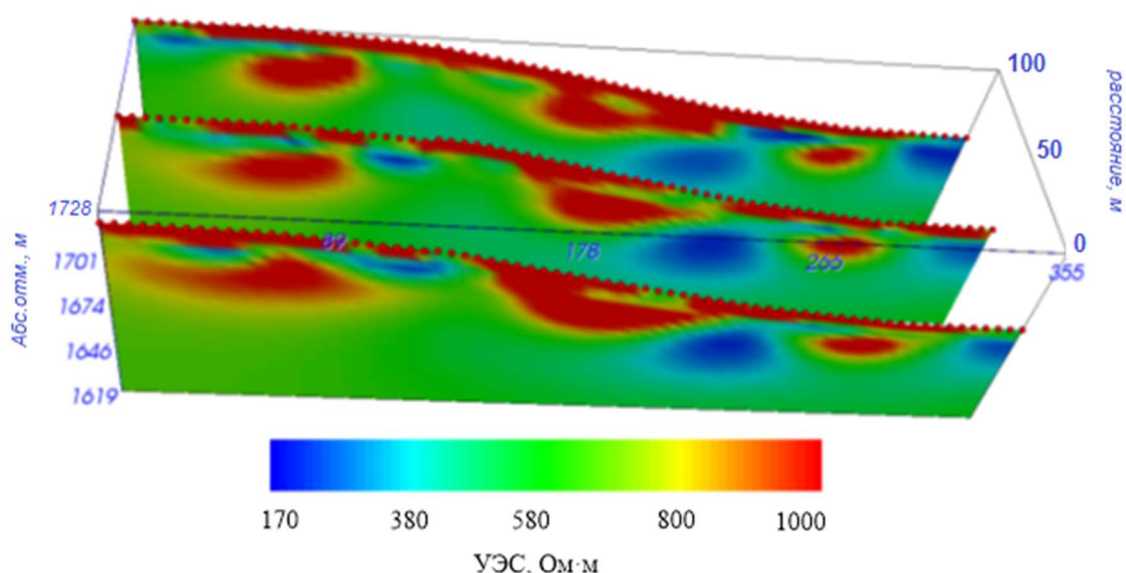


Рисунок 22 – Результат трехмерной инверсии площадных данных электротомографии в Акташском грабене Курайской впадины.

В рельефе центральной части Курайской впадины также хорошо выделяется уступ, амплитуда которого составляет несколько метров. Уступ прослеживается по простиранию впадины параллельно р. Чуя, как бы ограничивая её приподнятую центральную часть. Для построения модели этой области были заложены 4 профиля электротомографии в крест простирания предполагаемой разломной структуры. В результате трехмерной инверсии площадных данных ЭТ построена геоэлектрическая модель, которая

характеризуется высокоомной верхней частью (УЭС в интервале 800-1000 Ом·м) и хорошо выраженной наклонной проводящей зоной с понижением УЭС до 200 Ом·м, которая, скорее всего, соответствует разломной структуре [Nevedrova et al., 2019] (Рисунок 23).

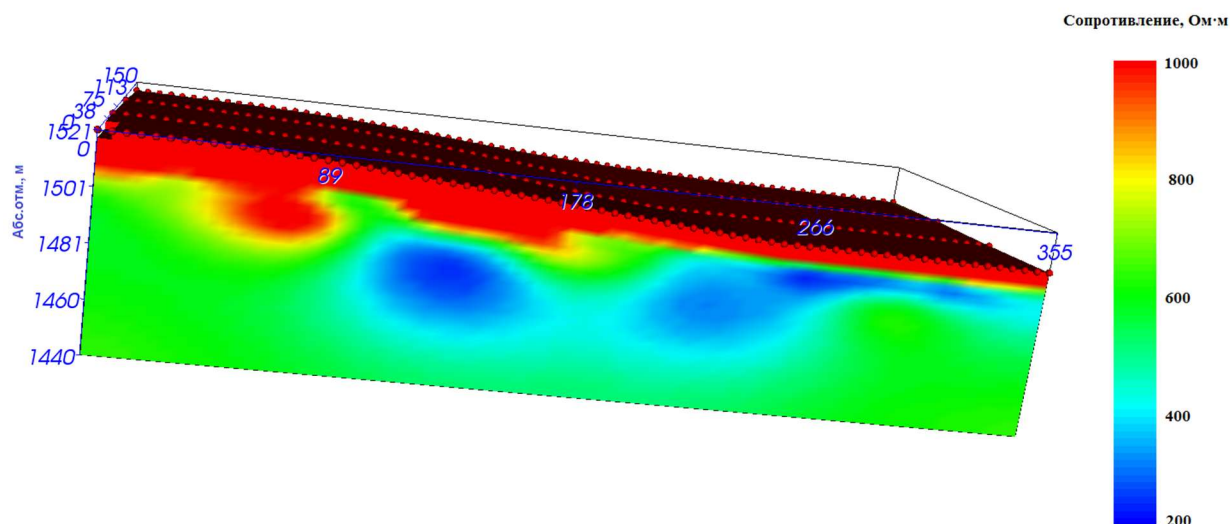


Рисунок 23 – Результат трехмерной инверсии данных электротомографии за 2018 г. в центральной части Курайской впадины.

2.2 Результаты численного моделирования

По мере накопления полевых данных и результатов интерпретации было привлечено численное моделирование. Оно используется как на этапе планирования измерений, чтобы обеспечить необходимую детальность и глубинность измерений, возможную сеть профильных наблюдений, так и для интерпретации данных для выбора оптимального программного комплекса и повышения достоверности результатов.

Ниже представлен краткий анализ и сравнение функционала задействованных программных комплексов электротомографии. Разумеется, каждое приложение снабжено подробным руководством пользователя, однако на практике многие специалисты полагаются на автоматические режимы обработки, которые далеко не всегда являются оптимальным выбором для конкретной геологической задачи.

В конце девяностых годов рынок программного обеспечения для геофизики был представлен преимущественно импортными продуктами, среди которых выделялись разработки компании Geotomo Software. В последующий период все более заметную роль стали играть отечественные программные комплексы, и одним из ярких примеров является пакет Zond. В настоящее время разработаны аналогичные средства в ИНГГ СО РАН с учетом современных достижений в алгоритмах и интерфейсах, такие как SCALA-48(GPU), DiInSo [Модуль численного трёхмерного...., 2017; <http://diinso.sourceforge.net/>]. Собственные разработки постоянно совершенствуются с учетом поставленных задач и тестируются на полевых данных [Шапаренко и др., 2023].

Для инверсии, моделирования, построения геоэлектрических разрезов по результатам измерения методом ЭТ чаще всего используется известное программное обеспечение **Res2DInv**. Эта программа разработана для инверсии больших массивов данных (от 200 до 6500 точек) профильной системы наблюдений с числом электродов от 25 до 1800. Инверсия выполняется с использованием метода наименьших квадратов с ограничением гладкости.

Параметры сетки при инверсии данных ЭТ могут задаваться различными способами, что удобно в случае известной априорной информации. Особенностью программы двумерной инверсии является то, что модель среды в пределах профиля представляется совокупностью двумерных блоков с жестко зафиксированными границами. Распределение и размер прямоугольных блоков сетки автоматически генерируются программой, так что число блоков не превышает числа точек измерения. Однако программа имеет опцию, которая позволяет пользователю задать данные, по которым число блоков будет превышать число точек измерения. Глубина подошвы блоков принимается примерно эквивалентной глубине исследования для точек с максимальным разносом, что повышает надежность построения разреза [Шапаренко и др., 2023].

Для моделирования существует дополнительный программный пакет Res2DMod, позволяющий решать прямую задачу для произвольно заданной модели.

Программный комплекс ZondRes2D ориентирован на двумерную и квазитрёхмерную (2–2,5D) интерпретацию данных профильных наблюдений методами электротомографии, вызванной поляризации и заряда. Прямая и обратная задачи решаются с применением метода конечных элементов. В двумерной постановке элементы описываются функциями пространственных координат x^* и y^* , при этом преимущественно используются симплекс-элементы треугольной или четырёхугольной формы. Дополнительно предусмотрена возможность агрегации смежных ячеек. В составе ZondRes2D реализована система моделирования, охватывающая все основные типы электродных установок, применяемых в методе сопротивлений. На этапе построения модели пользователю доступны различные стратегии, в том числе блочный и полигональный режимы задания геометрии среды. Выбор конфигурации установки и числа измерительных точек осуществляется в интерактивном диалоговом режиме. Решение обратной задачи базируется на регуляризованном методе наименьших квадратов; предусмотрена возможность выбора одного из нескольких алгоритмов инверсии, а именно: Occam, Smoothness constrained, Marquardt, Focused и Blocks.

В программе **SCALA-48(GPU)**, разработанной И.В. Суродиной (ИНГГ СО РАН), используется метод сопряжённых градиентов с авторским предобуславливателем, обеспечивающим полное распараллеливание и высокую скорость расчётов на GPU [Labutin, Surodina, 2013]. Трёхмерное моделирование по данным электротомографии сводится к моделированию распределения электрического потенциала точечного источника в любой трёхмерной среде с заданными параметрами. В зависимости от моделей и установок используются различные сетки, которые строятся отдельной программой – генератором сеток. Быстрый решатель существенно ускоряет

решение практических задач. Для расчёта конкретной модели использовалась неравномерная по каждой оси сетка.

Еще один программный комплекс **DiInSo** (Direct-Inverse-Solver) предназначен для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач электротомографии на постоянном токе. DiInSo написан на языке программирования C/C++ с применением многопоточных алгоритмов [Marinenko, 2020].

Для прямой задачи подразумевается, что известно геологическое строение исследуемой области и необходимо оценить эффективность той или иной многоэлектродной установки (или нескольких установок) для работы в этой области. Прямая задача начинается с построения модели исследуемой области и разбивки этой модели на конечные элементы — тетраэдры. При этом, положения установки задаются на этой сетке либо вручную, либо в автоматическом режиме. Положение электродов должно совпадать с узлами сетки. Решение прямых задач (моделирование) осуществляется узловым методом конечных элементов на базисных функциях первого порядка. Для решения системы линейных алгебраических уравнений доступны различные итерационные решатели и предобуславливатели к ним, из которых метод сопряжённых градиентов наиболее применим к рассматриваемому типу задач [Шапаренко и др., 2023].

Обратные задачи могут решаться как в 2D постановках (один профиль), так и в 3D (множество профилей). В процессе решения обратной задачи также требуется построение сетки — треугольной в 2D случае и тетраэдральной в 3D случае. Сетка при этом строится автоматически, но пользователь может контролировать мелкость и сгущение конечных элементов в области моделирования. Для инверсии используется схема Гаусса-Ньютона. Пользователь имеет возможность выбрать параметр регуляризации, что, например, позволяет усилить контрастность подобластей для обнаружения слабоконтрастных объектов, использовать для решения выбросоустойчивый (робастный) метод, учесть топографический эффект, ограничить решение

некоторым диапазоном значений сопротивлений, включить в модель априорную информацию о геологической среде [Шапаренко и др., 2023].

При моделировании рассматриваются различные параметры разломных структур, выбранные на основе результатов интерпретации ЭТ – от простых к более сложным. Сначала решается прямая задача, а затем для полученных синтетических данных выполняется инверсия [Шапаренко и др., 2023].

В первую очередь была выбрана модель с вертикальной границей, разделяющей два блока с разными значениями УЭС. Результаты моделирования получены с помощью программ Res2Dmod, ZondRes2D, SCALA-48 (GPU) (Рисунок 24).

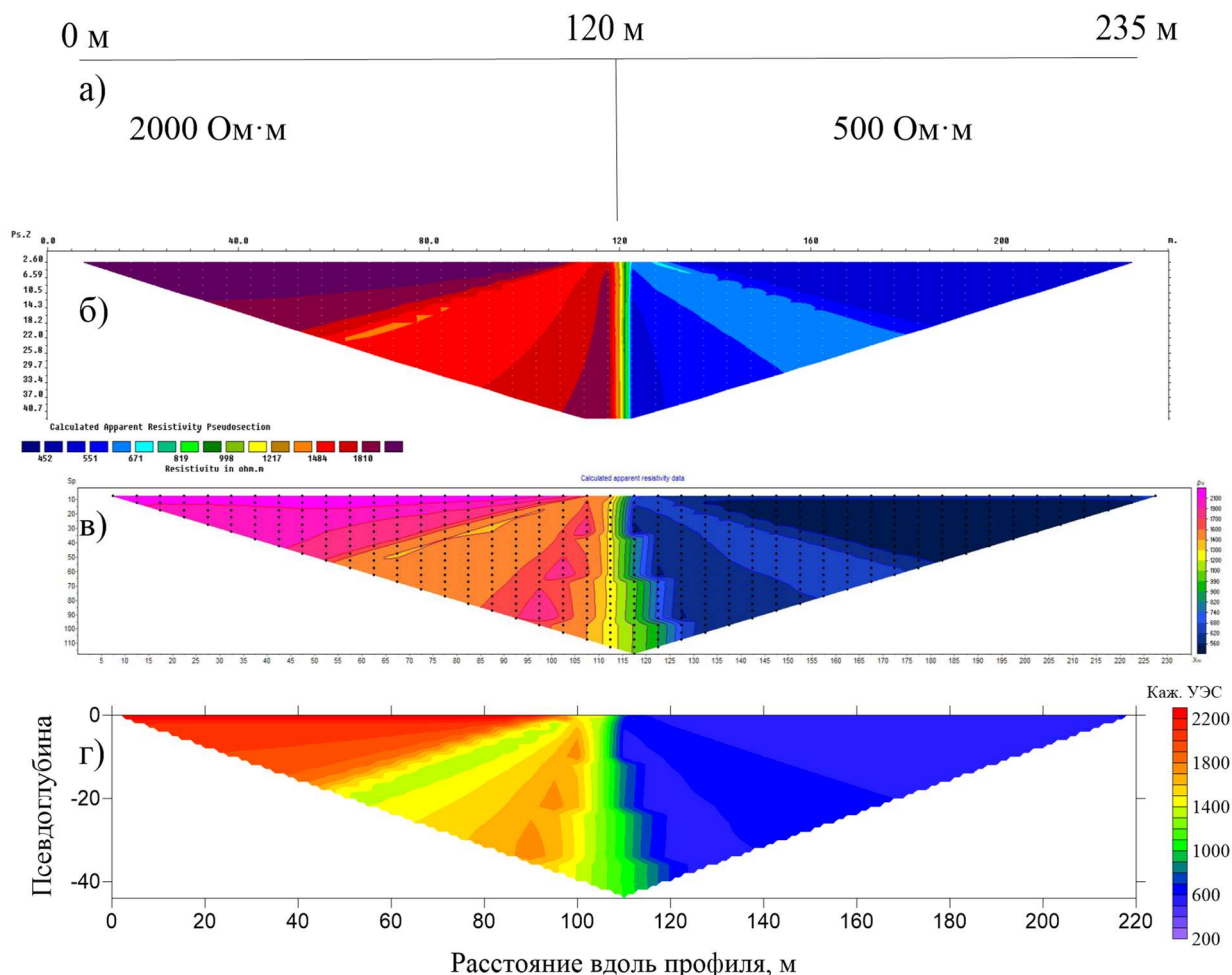


Рисунок 24 - Модель (а) и результаты моделирования с использованием программ Res2Dmod (б), ZondRes2D (в), SCALA-48 (GPU) (г) [Шапаренко и др., 2023].

На рисунке 24 видно, что по результатам моделирования вертикальная граница между блоками выделяется по-разному, что связано с особенностями построения расчетной сетки в каждой из программ. Можно отметить, что при использовании программы Res2Dmod граница отражается наиболее адекватно, так как сетка представлена прямоугольными блоками. При работе с программами ZondRes2D, SCALA-48 (GPU) эта граница как бы «размывается». Так как элементы сетки – тетраэдры, между блоками с разными значениями УЭС появляется некоторая переходная зона.

На втором этапе выполнены расчеты над моделями с целью верификации наклонных границ (Рисунок 25).

Учитывая опыт применения электротомографии на разных участках межгорных впадин, можно заключить, что разломные структуры выделяются значимым понижением УЭС относительно вмещающих пород, на которое влияет изменение сейсмического режима исследуемой территории.

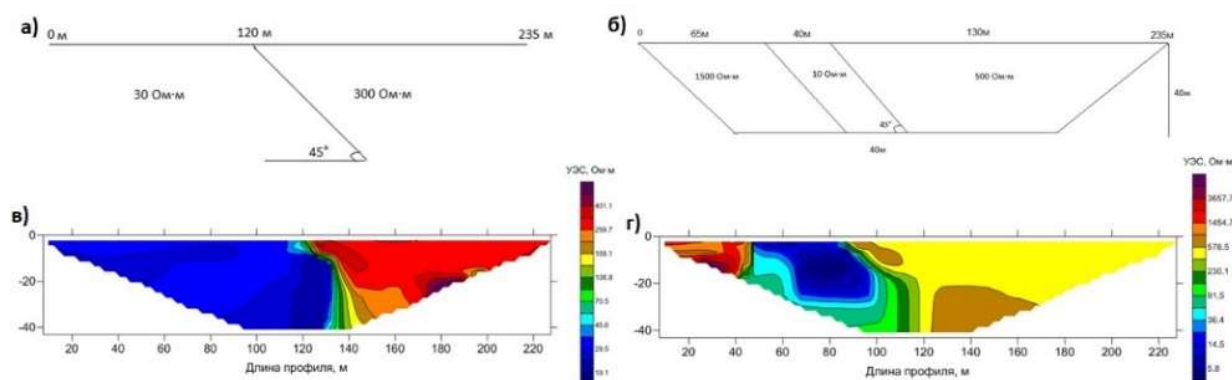


Рисунок 25 – Результат моделирования наклонных границ. а), б) – модели; в), г) – результат инверсии модельных данных [Шапаренко и др., 2023].

На рисунках 25а и 25б показаны построенные модели с наклонными границами. Модель 25б является несколько упрощённым отражением реальных данных, полученных в Горном Алтае. При моделировании использовалась установка Шлюмберже с шагом 5 м между электродами. Такая установка является одной из самых распространенных. Результаты моделирования и инверсии показывают, что угол наклона границы определить

проблематично (Рисунок 25в, г). Возможно, что это связано с недостаточной глубиной исследования. Для вертикальной проводящей зоны результат получен более достоверный [Шапаренко и др., 2023].

В дальнейшем прямая задача решалась с использованием программы SCALA-48(GPU). Выбраны различные модели с вертикальными и наклонными под разными углами границами.

Сопоставлены результаты инверсии синтетических данных с использованием нескольких программ для моделей как с вертикальной границей, так и разными углами наклона границы между двумя блоками (Рисунки 26, 27).

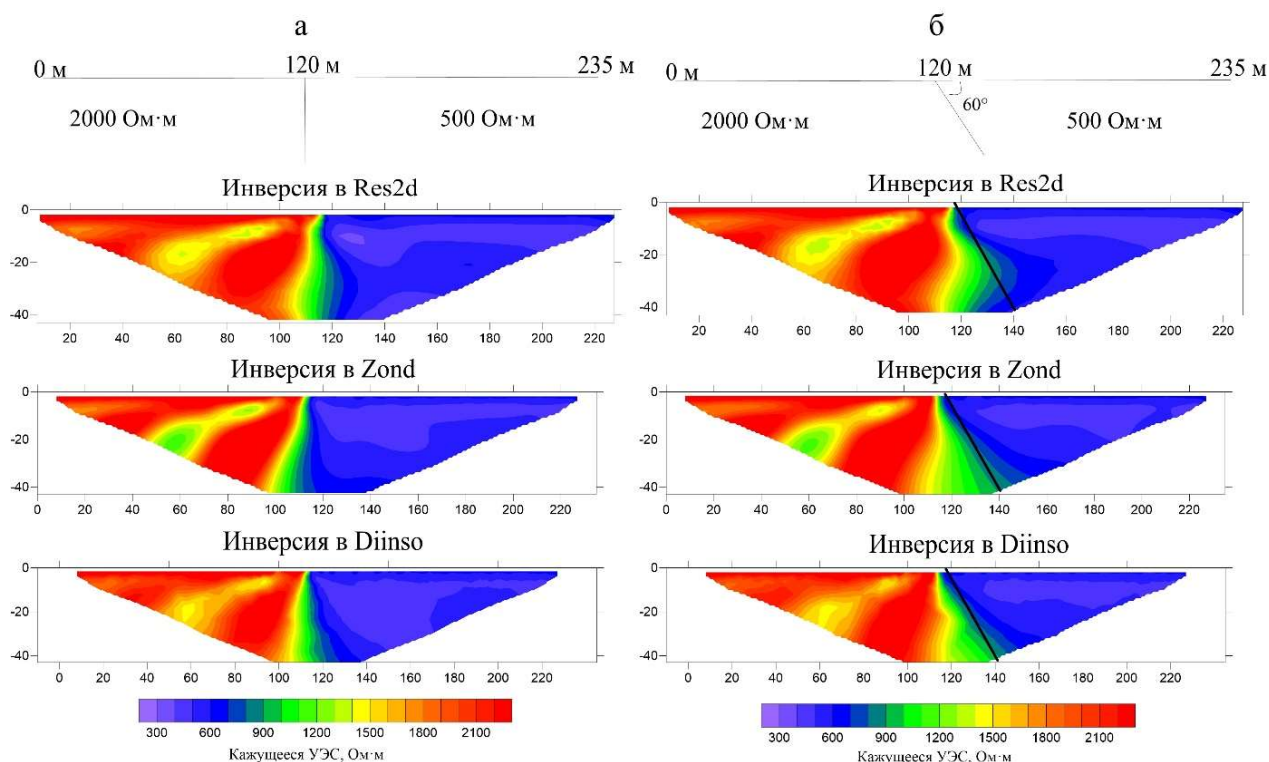


Рисунок 26 - Модели и результаты инверсии синтетических данных (программы Res2DInv, ZondRes2D, DiInSo); а – для модели с вертикальной границей, б – с наклоном границы 60° (отсчет от горизонтали) [Шапаренко и др., 2023].

Анализ полученных после инверсии разрезов показывает, что наличие вертикальных и наклонных границ выделяется переходной областью. Угол падения визуально лучше определяется с использованием программ ZondRes2D и DiInSo, а не Res2DInv. Кроме того, следует отметить, что

сопутствующие артефакты (ложные аномалии), которые наблюдаются при инверсии в высокоомных блоках, меньше всего выражены на разрезе, полученном в программе DiInSo [Шапаренко и др., 2023].

По рисунку 27 можно судить как проявляется на разрезах наклон границы с более острыми углами в 45 и 30 градусов. В результате инверсии с использованием всех трёх программных средств на разрезе между блоками с УЭС 2000 Ом·м и 500 Ом·м наблюдается переходная область со средним значением УЭС - 1250 Ом·м. Граница этой переходной области с блоком, имеющим УЭС в 500 Ом·м, наиболее правильно (количественно) отражает угол наклона при расчетах с использованием программы DiInSo [Шапаренко и др., 2023].

Таким образом, предварительное тестирование программных средств на простых моделях позволяет выбрать оптимальную программу для определения истинных углов наклона границ между контрастными по УЭС блоками [Шапаренко и др., 2023].

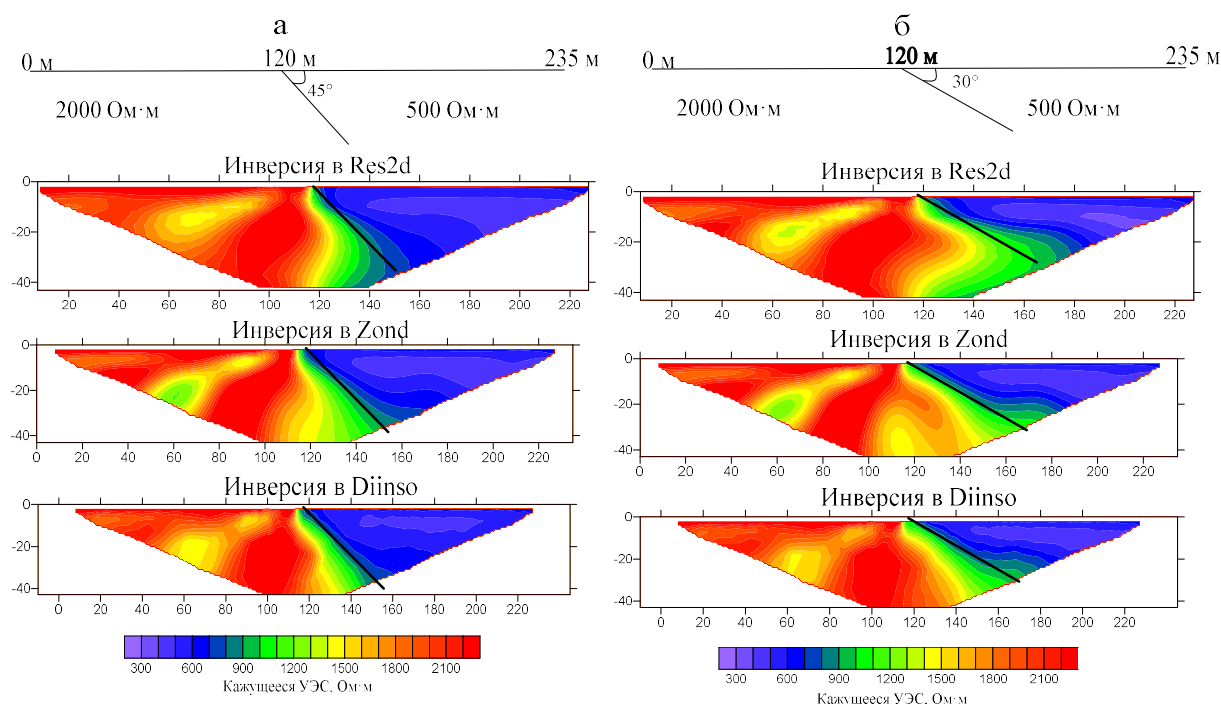


Рисунок 27 - Модели и результаты инверсии синтетических данных (программы Res2DInv, ZondRes2D, DiInSo); а – для модели с наклоном границы 45°, б – с наклоном границы 30° (отсчет от горизонтали) [Шапаренко и др., 2023].

Для составления более сложных моделей с разломной зоной за основу были взяты параметры геоэлектрического разреза по данным ЭТ в районе пос. Мухор-Тархата.

Построены геоэлектрические модели с низкоомной вставкой, имитирующей вертикальную и наклонную разломную зоны шириной 40 м и $УЭС = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Эта зона разделяет два высокоомных блока $УЭС 1500$ и $500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. На рисунке 28 показаны выбранные модели, их геоэлектрические параметры – $УЭС$ и размеры блоков по горизонтали, а также результаты модельных расчетов [Шапаренко и др., 2023].

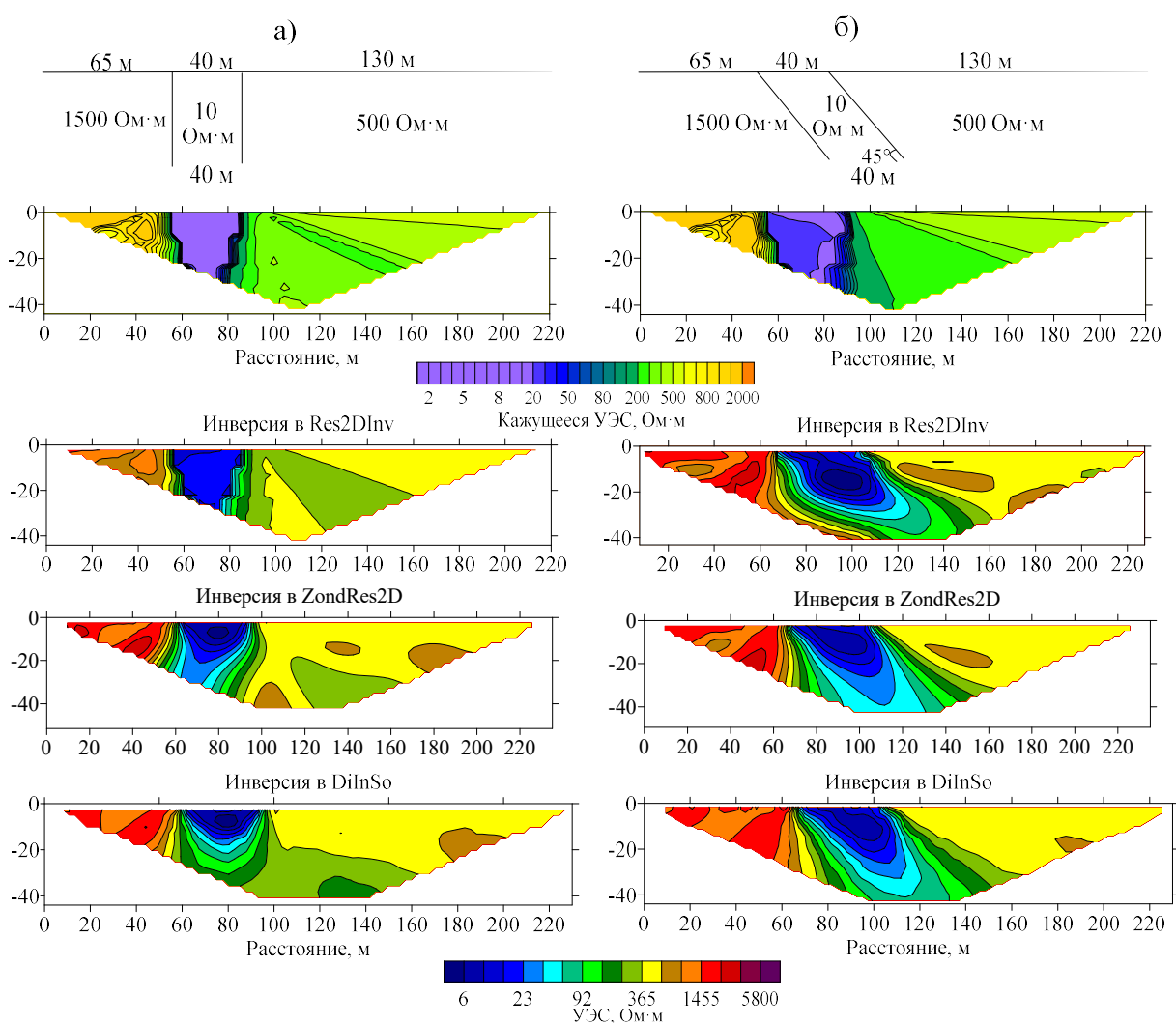


Рисунок 28 - Модели разломной зоны с $УЭС 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, результаты решения прямой задачи (программа SCALA-48(GPU)) и инверсии с использованием трёх программ Res2DInv, ZondRes2D и DiInSo; а) для зоны с

вертикальными границами, б – с наклонными; сверху вниз: выбранная модель, результаты моделирования, результаты инверсии [Шапаренко и др., 2023].

В данном случае вертикальная разломная зона выделяется как в результате решения прямой задачи, так и в результате инверсии синтетических данных (Рисунок 28а). Если имеются наклонные границы, то по результатам моделирования угол наклона количественно не определяется (Рисунок 28б). Инверсия модельных данных с использованием DiInSo или ZondRes2D позволяет более адекватно определить наклон сместителя разломной структуры по модельным данным, по сравнению с Res2DInv. Стоит также отметить, что сопутствующие артефакты (ложные аномалии), которые наблюдаются при инверсии в высокоомных блоках, меньше всего выражены на разрезе, полученном в программе DiInSo.

В следующем случае разломная зона (как вертикальная, так и наклонная) размещается в середине профиля (Рисунок 29).

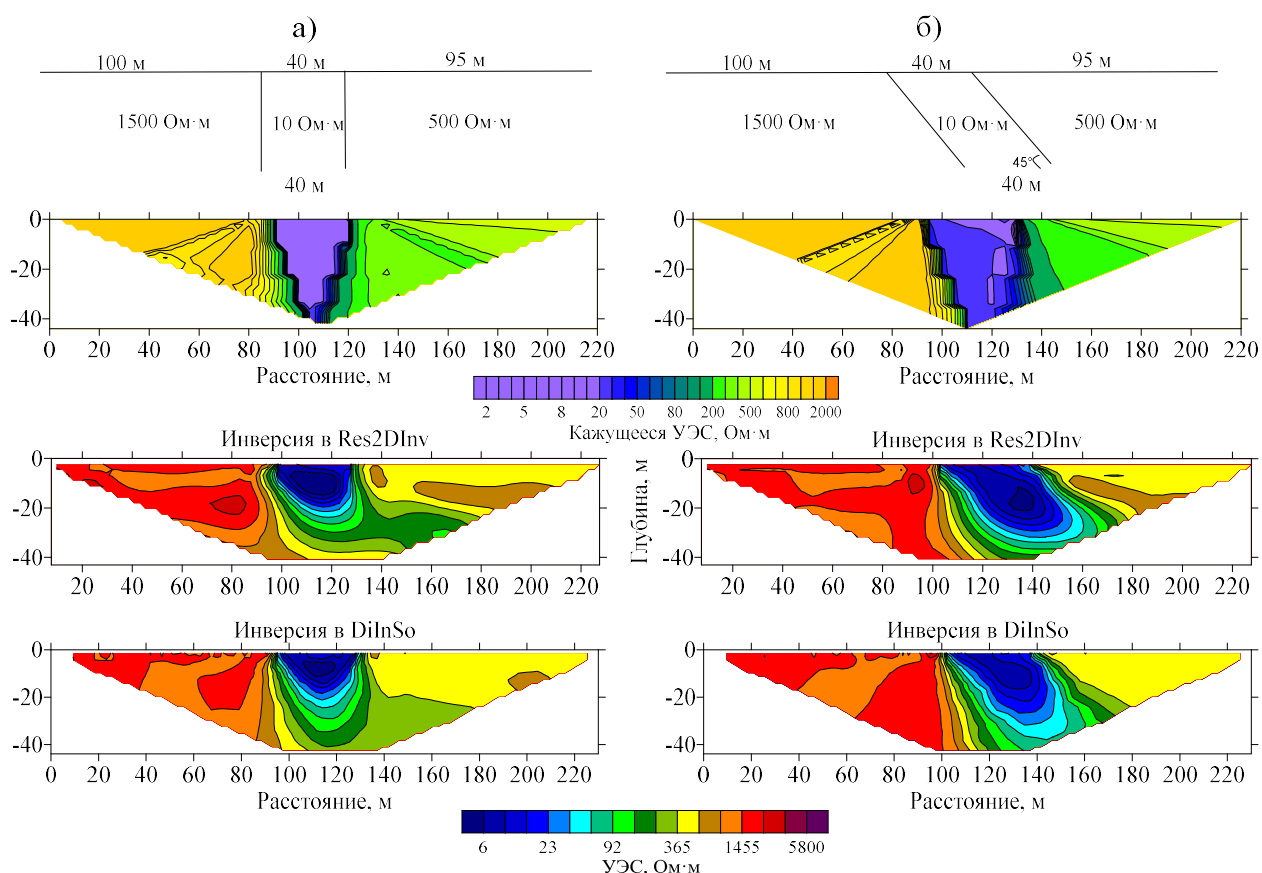


Рисунок 29 - Сверху вниз: модель разломной структуры; результат моделирования; разрез с вертикальной (а) и наклонной (б) разломными

зонами по результатам инверсии расчетных данных в программах Res2D и DiInSo.

При размещении в модели разломных зон посередине профиля (Рисунок 29) результат значительно отличается от предыдущего (Рисунок 28): и по расчетным данным по результатам моделирования и инверсии модельных данных угол наклона разломной зоны и ее границы визуально выделяются значительно точнее.

Результаты моделирования показывают, что в структуре с наклонной разломной зоной ее границы и угол наклона визуально выделяются точнее, когда она находится в центре профиля. Следовательно, для получения более точной информации о строении разломной структуры середина профиля ЭТ должна находиться как можно ближе к середине разломной зоны.

Модели с перекрывающим верхним слоем

На примере следующих моделей выясняется, при каком контрасте УЭС вертикальной разломной зоны и вмещающей среды она будет выделяется. В случае присутствия перекрывающего верхнего слоя с УЭС=100 Ом·м и мощностью в 10 м. Проводящая зона разделяет разрез на две близкие по ширине высокоомные блоки с близкими значениями УЭС (7000 и 8000 Ом·м). Рассматривается шесть моделей, для которых УЭС зоны изменяется от 50 до 2000 Ом·м при постоянной ширине в 25 м, УЭС вмещающих блоков остается постоянным (Рисунок 30а).

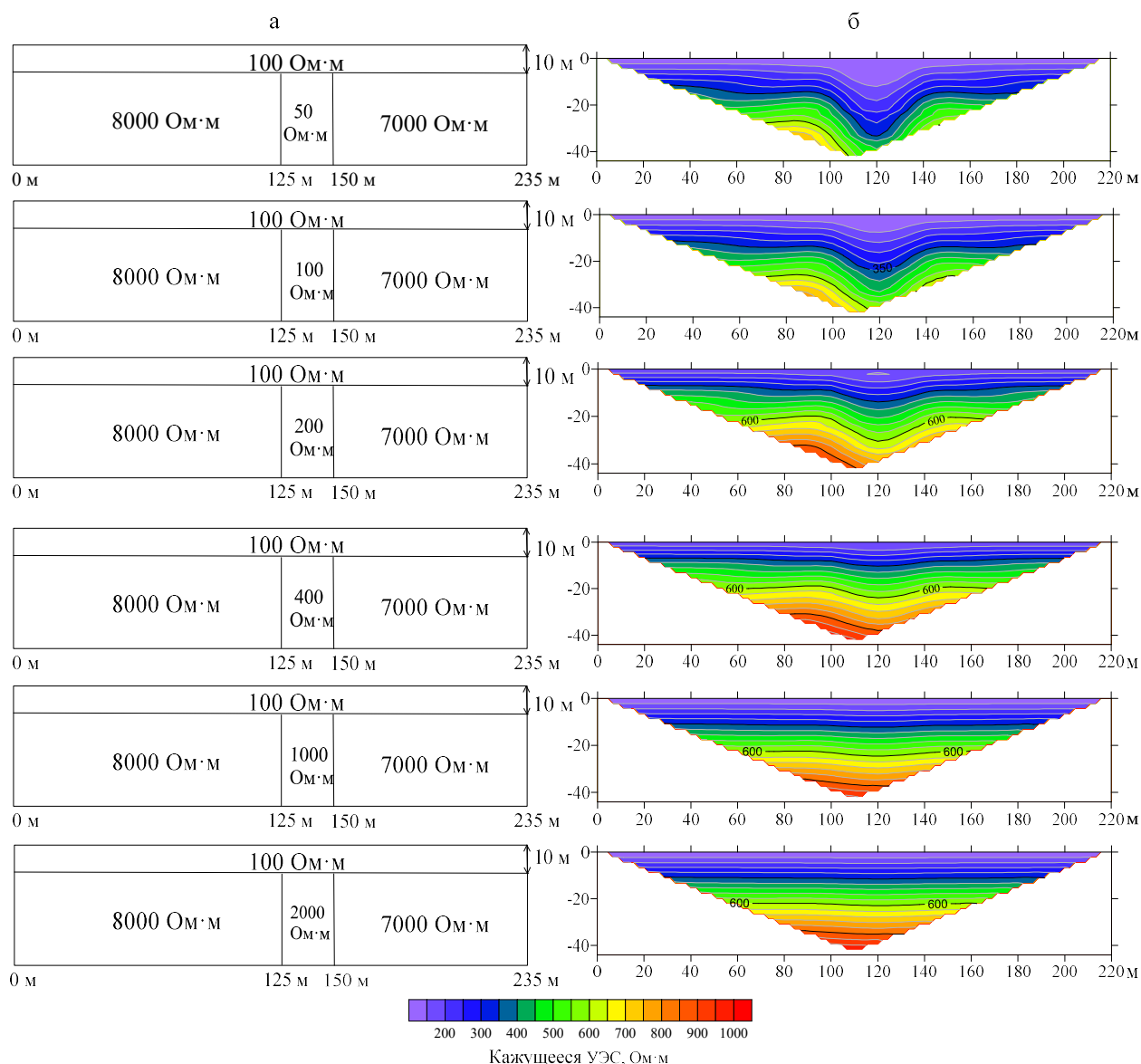


Рисунок 30 – Модели вертикальной разломной зоны с разными значениями УЭС и перекрывающим верхним слоем (а) и результаты моделирования (б).

По результатам моделирования (Рисунок 30б) видно, что разломная зона надежно выделяется только в случаях, когда её УЭС находится в интервале 50-200 Ом·м, что существенно (~ в 40 раз) меньше УЭС вмещающей высокоомной среды (7000-8000 Ом·м).

Далее рассмотрим еще одну геоэлектрическую модель с разломной зоной с УЭС=100 Ом·м и перекрывающим верхним высокоомным горизонтом мощностью 10 м и УЭС=1000 Ом·м. В случае, когда УЭС перекрывающего слоя намного больше УЭС разломной зоны, она чётко выделяется по результатам моделирования (Рисунок 31).

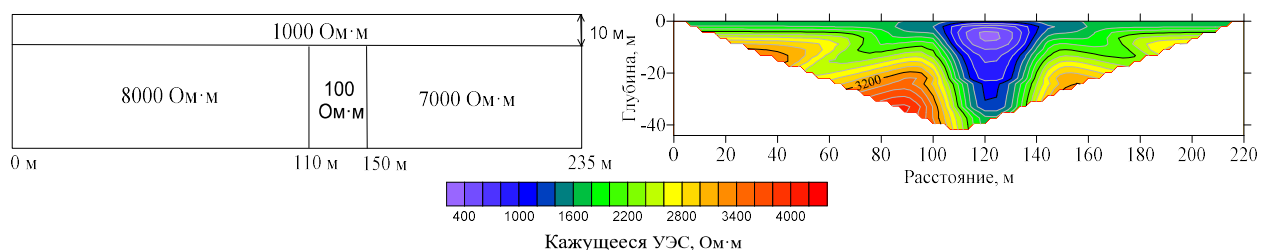


Рисунок 31 – Модель с проводящей разломной зоной и верхним перекрывающим высокоомным слоем (слева) и результат моделирования по (справа).

Рассматриваются также модели с разломной структурой, перекрытой верхним слоем с $УЭС=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и постоянным низкоомным значением $УЭС=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ для разломной зоны шириной в 40 м. Изменяется $УЭС$ вмещающей среды, которое последовательно понижается от 6000 до 100 $\text{Ом}\cdot\text{м}$ (Рисунок 32а). Из анализа результатов моделирования (Рисунок 32б) следует, что разломная зона четко выделяется, когда $УЭС$ вмещающей среды составляет от 300 до 1000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$, т.е в 5-6 раз и более превышает $УЭС$ разлома. Однако при очень большом контрасте значений $УЭС$ между вмещающей средой (от 1000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$) и разломной зоной в виде низкоомной вставки (30 раз и более), она определяется лишь до глубины менее половины от максимальной. Для нижней модели с контрастом значений $УЭС$ всего в 2 раза получена «размазанная» практически по всей структуре низкоомная аномалия, разломная зона не выделяется.

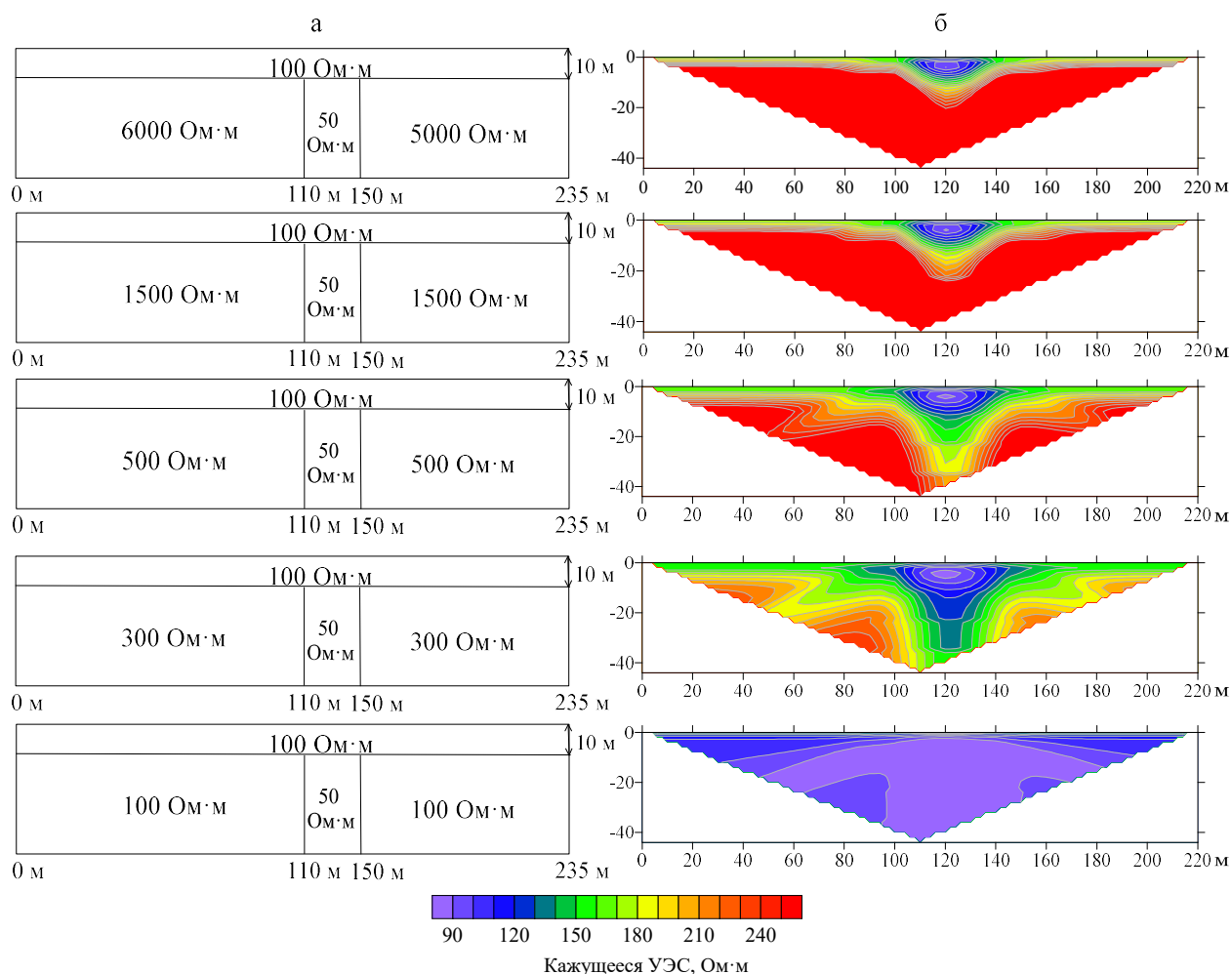


Рисунок 32 – Модели с верхним перекрывающим проводящим слоем (а) и результаты моделирования (б).

Кроме численного моделирования предприняты первые эксперименты с привлечением физического моделирования, для которого были созданы специальные средства, позволяющие его осуществить. Разработана физическая модель, имитирующая разломную структуру с возможностью изменять её размеры. Она помещалась в бассейн, заполненный водой, создающей однородную окружающую среду. В отличие от численного моделирования, при проведении физических экспериментов возникает больше трудностей, связанных с созданием подходящих моделей, адаптацией соответствующей аппаратуры и установок для измерений. Поэтому в дальнейшем планируется продолжение работы в этом направлении [Шапаренко, Неведрова, Карин, 2023].

Выводы

Изучение и обобщение массива полевых данных электротомографии, собранных в Горном Алтае, дало возможность построить типичные для этого региона геоэлектрические модели разломов. В этих моделях были учтены как характерная ширина нарушений, так и их УЭС. На следующем этапе, путем математического моделирования и инверсии синтетических данных в нескольких программных средствах с различным функционалом, был определен наиболее эффективный алгоритм интерпретации. Такой подход позволяет повысить надежность и достоверность итоговой геологической интерпретации, что особенно важно при ограниченном объеме априорной информации.

2.3 Мониторинг геоэлектрических параметров в разломных зонах Горного Алтая. Интерпретация

Как уже отмечалось в задачи мониторинга входит как накопление данных регулярных наблюдений, так и их интерпретация, анализ результатов. Если рассмотреть ретроспективно как выполняется интерпретация данных активного мониторинга на постоянном токе можно выделить два направления. Чаще всего рассчитывают вариации кажущегося удельного сопротивления, т.е. сигналы. В качестве примера можно привести многолетний эксперимент на территории Гармского полигона (Таджикистан) с использованием дипольных зондирований с разносами в 5-10 км, далее с привлечением МГД-генератора разносы были увеличены до 40 км. В результате была установлена связь вариаций кажущегося УЭС, достигающих 20 %, с землетрясениями в радиусе до 15 км от пункта наблюдений. В целом перед событием за 2-3 месяца наблюдалось уменьшение сопротивлений, которое затем постепенно восстанавливалось [Барсуков О.М., 1970]. Аналогичные явления наблюдались в Китае по данным ВЭЗ с разносами до 3 км [Qian, 1984].

В ИНГГ СО РАН был предложен другой подход, основанный на решении обратных задач. В этом случае вначале восстанавливается геоэлектрическая

модель в пункте наблюдений для каждого регулярного измерения и затем рассчитываются вариации геоэлектрических параметров для этой модели. Электромагнитный мониторинг разломных структур Горного Алтая проводится в ИНГГ СО РАН с 2004-го года после крупного Чуйского землетрясения ($M=7,3$). Основными методами мониторинга являлись вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и зондирование становлением поля (ЗСБ) в нескольких модификациях [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

С развитием аппаратных и интерпретационных средств метода электротомографии его также стали применять для регулярных наблюдений на участках с разломными структурами Горного Алтая, начиная с 2012 года. В настоящее время, кроме Чуйской межгорной впадины, к объектам исследования относятся и разломы Уймонской впадины. В каждой из этих депрессий есть профили ЭТ, на которых измерения проводятся регулярно [Шапаренко, Неведрова, 2024б]. В качестве примера рассмотрим эксперименты в Чуйской впадине.

2.3.1 Чуйская впадина

Инициативные регулярные наблюдения методом ЭТ выполняются по профилям в зоне разломов на двух участках Чуйской впадины: в районе поселка Мухор-Тархата и в её северной части в долине р. Чаган один раз в год.

Участок Мухор-Тархата

Рассмотрим результаты мониторинга. На рисунке 33 приведены разрезы двумерной инверсии полевых данных электротомографии по профилю 3 за 5 лет измерений. Этот профиль выбран, так как на нем ярче всего проявляется разломная зона.

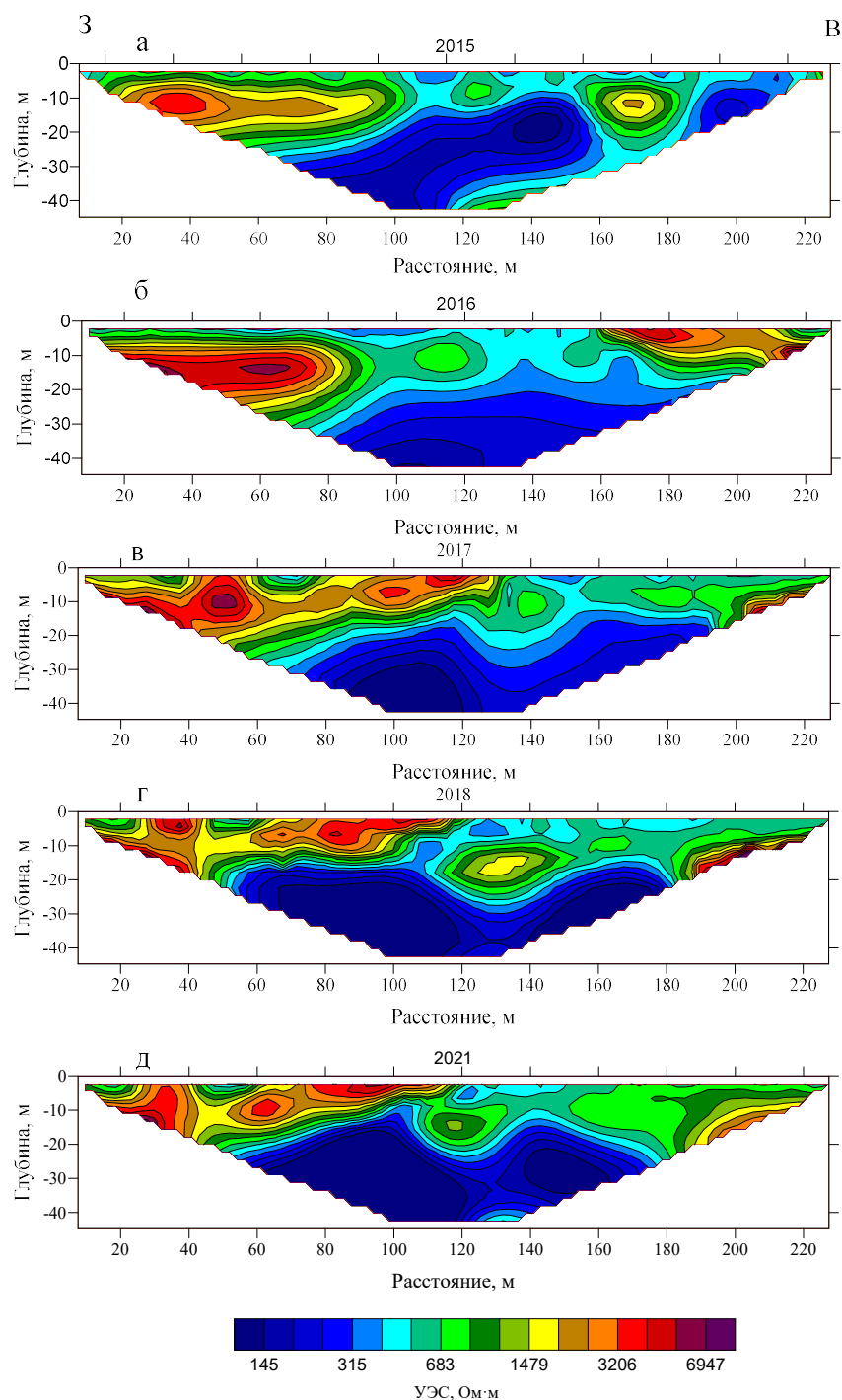


Рисунок 33 — Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии на участке Мухор-Тархата (профиль 3); а - за 2015 год, б - за 2016 год, в - за 2017 год, г - за 2018 год, д — за 2021; (программа Res2DInv) [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

Анализ геоэлектрических параметров разрезов за 2015 и 2016 годы показал, что на них в центральной части хорошо выделяется зона с пониженными значениями УЭС относительно вмещающей среды,

соответствующая разломной структуре, подтвержденной геологическими данными [Шалагинов и др., 2018]. Даже визуальное сопоставление разрезов за разные годы показывает, что наблюдаются изменения значений УЭС в верхней и нижней части разрезов. В частности, в 2016 году до глубины в 20-25 м получены более высокоомные и протяженные блоки по сравнению с 2015 г. В последующие 2017, 2018 и 2021 годы также видны изменения значений УЭС по всему разрезу, причем зоны повышенного УЭС с течением времени уменьшаются [Шапаренко, Неведрова, 2020].

Для анализа вариаций геоэлектрических параметров в разломных зонах использован показатель сейсмической активности по сейсмологическим данным (число событий и количество выделившейся сейсмической энергии). Графики этих показателей за каждый год демонстрируют изменения в афтершоковом процессе Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7.3$), который характеризуется несколькими периодами активизаций и затиший. Регулярные измерения электротомографии были начаты, когда в целом этот процесс постепенно затухает, но тем не менее, наблюдается тенденция роста этих показателей с 2014 по 2021 гг., т.е. в периоды повышения сейсмической активности (Рисунок 34).

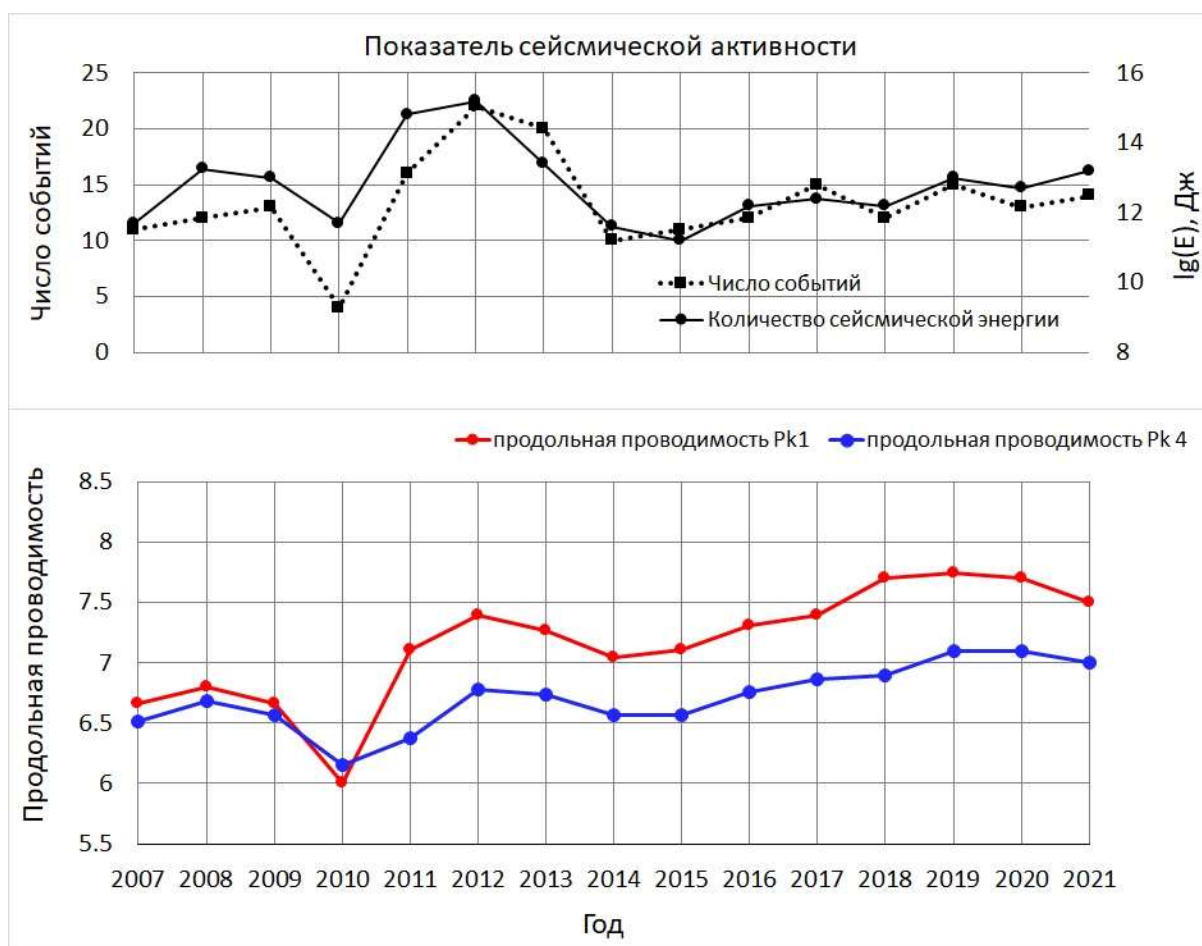


Рисунок 34 – Сопоставление значений продольной проводимости с показателями сейсмичности в период 2007–2020 гг. [Шалагинов и Неведрова, 2023]

По рисунку 34 видно, что показатель сейсмичности и полученные значения продольной проводимости проводящего слоя хорошо согласуются между собой по времени.

Для получения корреляции между изменением УЭС сейсмической активностью рассмотрим, например, данные ЭТ за 2015 и 2016 годы. Следуя рисунку 34 в 2016 году и количество сейсмической энергии, и число событий выросло. Для оценки изменений геоэлектрических параметров среды был выбран интервал разреза на расстояниях 60 - 190 м по профилю. Этот интервал примерно соответствует ширине разломной зоны, а также включает неоднородные перекрывающиеся верхние отложения до глубины около 20-25 м (Рисунок 35).

Разностный разрез между данными 2016 и 2015 годов показан в нижней

части рисунка 35. Для его построения рассчитывается разность в процентах между значениями УЭС за разные годы в каждом узле расчетной сетки инверсии. Формула вычисления разностного разреза следующая:

$$\frac{B-A}{A} * 100\% ,$$

В – массив значений УЭС в узлах сетки после инверсии за 2016 год, А – аналогичный массив за 2015 год [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

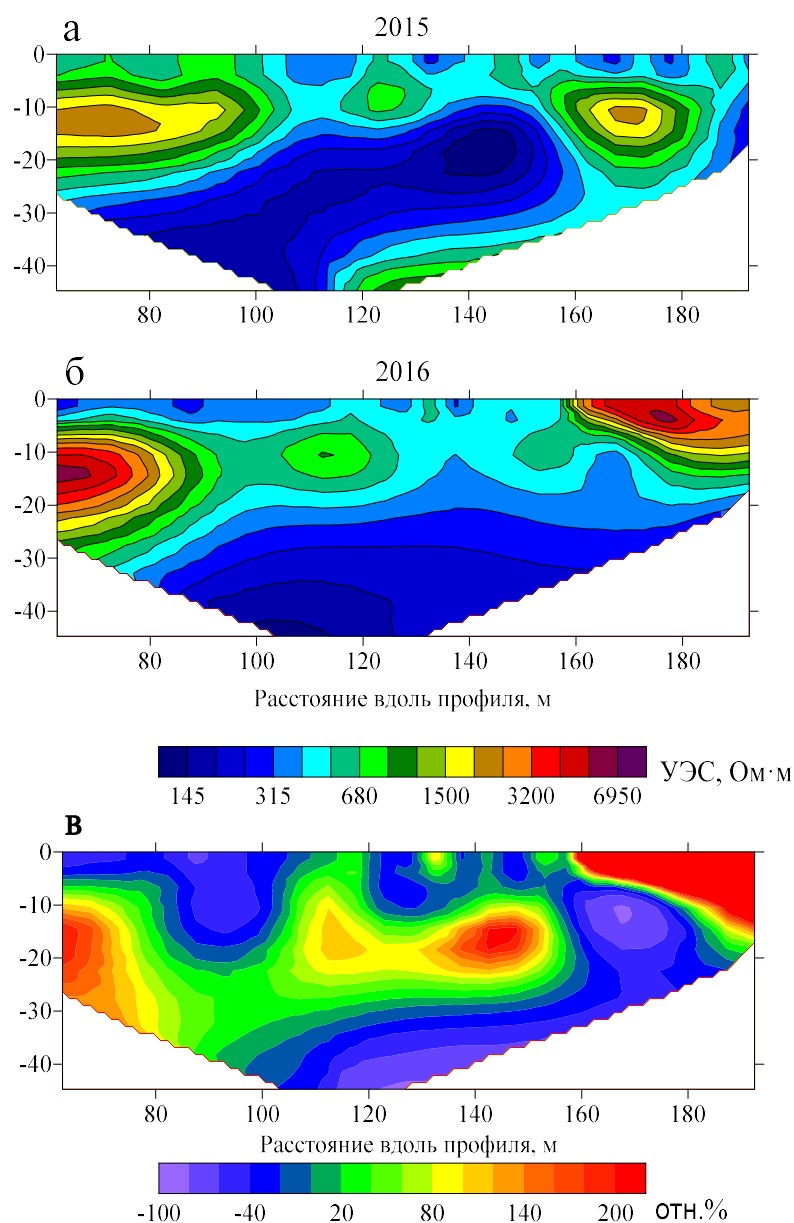


Рисунок 35 – Фрагмент геоэлектрического разреза в интервале профиля 60-190 м за 2015 (а) и 2016 (б) годы. Разностный разрез результатов инверсии 2016-2015 гг. (в) [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

Разностный разрез показывает относительное изменение УЭС в каждой точке, соответствующей узлу расчетной сетки. Наблюдаются протяженные зоны как повышения, так и понижения УЭС. Видно, что в разломной зоне в интервале 100-160 м на глубинах более 30 м УЭС в 2016 году существенно уменьшилось на 40-80 % относительно значений 2015 г. В интервале 160-190 м также расположена локальная зона аналогичного понижения значений УЭС практически по всей глубине. На отметках в глубину от 5 до 30-40 м в интервале разреза 60-190 м наблюдаются зоны значительного повышения УЭС в несколько раз [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

Аналогичным образом получен разностный разрез между результатами инверсии данных за 2018 и 2017 годы (Рисунок 36). В этом случае в 2018 г. показатели сейсмичности немного уменьшились. По рисунку 34 видно, что практически по всему разрезу на разных глубинах, включая нижнюю часть разреза видны локальные зоны значительного повышения УЭС в несколько раз, включая самую нижнюю часть разреза. Вместе с тем, присутствуют области, в которых значения УЭС уменьшилось от 40 до 100 %.

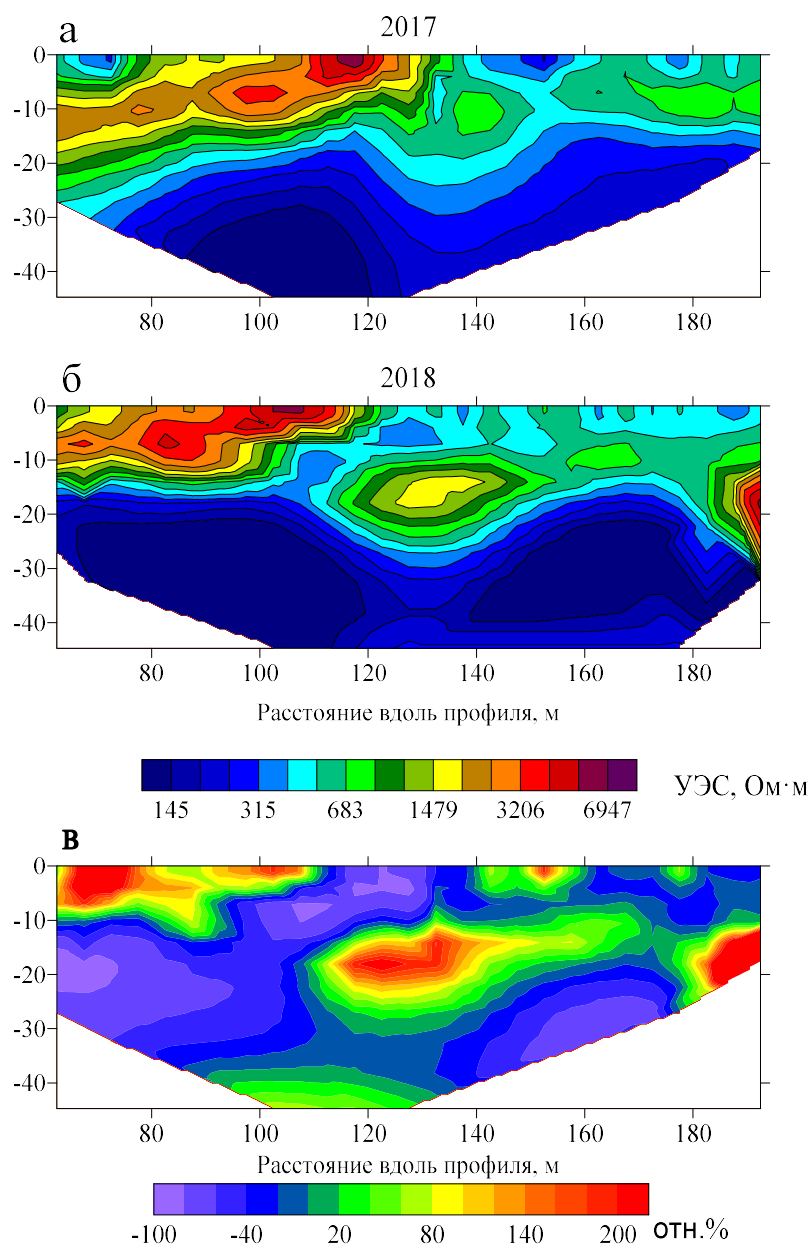


Рисунок 36 – Фрагмент геоэлектрического разреза за 2017 (а) и 2018 (б) годы. Разностный разрез по результатам инверсии 2018-2017 гг. (в) [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

Как уже отмечалось во временном интервале с 2015 г. до 2021 наблюдается тенденция увеличения показателей сейсмической активности (Рисунок 34). Для анализа изменения УЭС за период в 6 лет, рассмотрим разностные разрезы по данным за 2021 и 2015 годы (Рисунок 37).

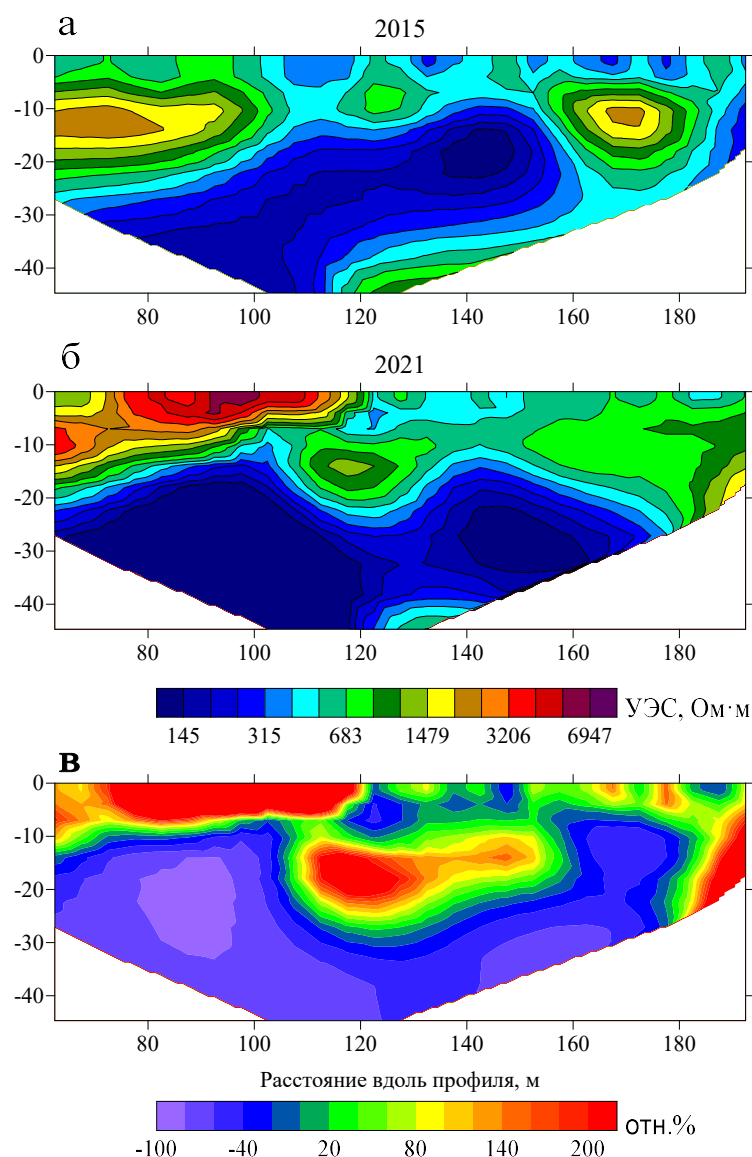


Рисунок 37 – Фрагмент геоэлектрического разреза за 2015 (а) и 2021 (б) годы. Разностный разрез по результатам инверсии 2021-2015 гг. (в) [Шапаренко, Неведрова, 2024б].

С глубины ниже 10 м в западной и восточной части разреза, а также в его центральной части с отметки ниже ~ 25 м выделяется обширная область понижения УЭС от 40 до 100 % (Рисунок 37, в). В данном случае, при общем увеличении количества сейсмической энергии в значительной области нижней части разломной зоны значения УЭС уменьшаются.

По результатам анализа разностных разрезов за 2015-2021 годы установлено, что при общем росте сейсмической активности в районе исследования УЭС в зоне разлома на глубине ниже 25 м в среднем

уменьшается. Данная закономерность наблюдается и по результатам работ методом ЗСБ. УЭС верхней же части разломной зоны (до 20 м) в разные годы изменяется мозаично, увеличиваясь и уменьшаясь в отдельных областях. Это может быть связано с неоднородностью подповерхностного пространства, а также с различными природными факторами (температурный, гидрогеологический режим), влияющими на УЭС верхней части разреза.

Глава 3. Изучение суффозионно-просадочных процессов в Прикаспийской впадине методом электротомографии

Поскольку развитие суффозионного процесса – это аномальное разуплотнение, приводящее к изменению электропроводности объема горных пород, то этот процесс хорошо проявляется в гравитационном и электрическом полях. Поэтому применение методов электроразведки вполне обосновано для определения строения и геофизических параметров на участках с проявлениями суффозии.

Геологические данные. В геолого-структурном отношении участок исследования расположен во внутренней части северной бортовой зоны Прикаспийской впадины (Рисунок 38). В разрезе осадочного чехла можно выделить три структурных комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой, которые слагают отложения палеозоя (пермская система), мезозоя (триасовая, юрская и меловая системы) и кайнозоя (неогеновая и четвертичная системы) [Отчет «Исследование природы...», 2014].



Рисунок 38 – Карта Прикаспийской нефтегазовой провинции [Шалагинов и др., 2019].

Горные породы пермской системы представлены в основном гипсами, ангидритами с тонкими субгоризонтальными прослоями мелкокристаллических доломитов; толщей каменной соли с прослоями доломитов, ангидритов и гипса. В верхней части залегают отложения, сложенные пачкой мергелистых и песчанистых глин.

Литологический состав триасовых отложений представлен песками, полимиктовыми песчаниками, конгломератами и глинами. Разнозернистые песчаники, содержат глину, гальку кварца, кремней. Карбонатные глины с содержанием пирита имеют разнообразную пеструю окраску (красно-бурые, голубовато-серые).

Отложения юрской системы в районе участка исследования сложены песчано-глинистыми породами. Преобладают пески светло-серые, серые, коричневатые-серые, мелкозернистые, кварцевые, глинистые, содержащие рассеянную и в виде линз гальку кварца и кремня. Выше по разрезу пески сменяются песчано-глинистой толщей, характеризующейся переслаиванием

серых и темно-серых песчанистых глин с песком и алевроитом.

В меловой системе наблюдаются песчанистые глины, обладающие не ясной слоистостью, а также выделяются черные жирные глины. В глинах встречаются многочисленные друзы гипса, конкреции пирита и гнезда зеленовато-серого глауконитового песка. Выше по разрезу выделены слабо песчанистые, слюдистые, жирные глины. Окраска глин серая, темно-серая с зеленоватым оттенком. В глинах встречаются тонкие прослои крепких песчаников зеленовато серого цвета [Отчет «Исследование природы...», 2014].

Неогеновые отложения с резким стратиграфическим несогласием залегают на различных горизонтах нижнего мела и триаса. Нижняя часть разреза представлена зеленовато-серыми, темно-серыми глинами с прослоями зеленовато-серых глауконитовых песков, песчаников с галькой и гравием меловых пород. В верхней части залегают коричневые и красновато-бурые глины, суглинки, желтовато-серые пески [Отчет «Исследование природы...», 2014].

Отложения четвертичной системы образовались в континентальных условиях и представлены желто-бурыми, коричнево-бурыми, реже мелоподобными грубыми неслоистыми суглинками с редкой плохо окатанной галькой меловых отложений и хорошо окатанной мелкой галькой уральских пород.

В тектоническом плане для участка работ, как и для всей прибортовой зоны Прикаспийской впадины, характерно наличие над комплексом пород фундамента трёх структурных этажей, которые неадекватно реагировали на тектоническую активизацию региона, и образовали специфические, присущие только им, дислокации [Отчет «Исследование природы...», 2014].

Нижний структурно-литологический комплекс палеозоя, охватывающий породы до артинского века включительно, характеризуется тектоно-седиментационными структурами рифовых массивов.

В среднем структурно-литологическом комплексе, сложенном

пластичной солевой толщей кунгура, образовались резко дисгармоничные структуры по отношению, как к подстилающему, так и к перекрывающему этажам. Эти структуры получили в геологической литературе название "соляные", а области их распространения - области проявления "соляной тектоники" [Отчет «Исследование природы...», 2014].

Верхний структурно-литологический комплекс характеризуется своеобразием структурных форм, образованных в красноцветной толще верхней перми и триаса, основным морфологическим типом которых являются синклинальные складки.

Соляная тектоника видоизменила подсолевой структурный план, проявившись уже после образования континентальных красноцветных отложений верхней перми и терригенных толщ триаса. Однако развитие солянокупольных структур было во многом предопределено структурными особенностями элементов фундамента, поскольку соляные купола и валы большей частью повторяют ориентировку бортового подсолевого уступа.

Таким образом, поскольку участок исследования находится в области развития соляно-купольной тектоники, можно вполне обоснованно предположить, что деструктивные явления могут быть связаны с выщелачиванием растворимых солей, поступающих в почву с паводковыми водами в верхних слоях суглинков, супесей и глин [Аникеев, Леоненко, 2013].

Морфологически участок представлен делювиальным склоном и тремя речными террасами. Суффозионные воронки расположены на границе III надпойменной террасы (НПТ) и делювиального склона в тыловой закраине. В зоне сочленения делювиального склона и третьей надпойменной террасы, имеется небольшой уклон в сторону р. Илек и поверхностные воды впитываются в грунт.

Всего на территории участка присутствует 15 суффозионных образований в виде воронок разной величины. Для исследований был привлечен комплекс методов электроразведки, включающий зондирования становлением поля (ЗСБ), вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и

электротомография (ЭТ). Методом ЭТ выполнен самый большой объем измерений, результаты которых рассмотрены в этой главе.

Детальные измерения методом электротомографии проведены по 48 профилям длиной 355 м с расстоянием 10 м между ними и простиранием с севера на юг, а также по 11 профилям длиной 475 м, ориентированным с запада на восток (Рисунок 39). Применялась аппаратура «Скала-48» с использованием установки Шлюмберже, шаг между электродами составил 5 м.

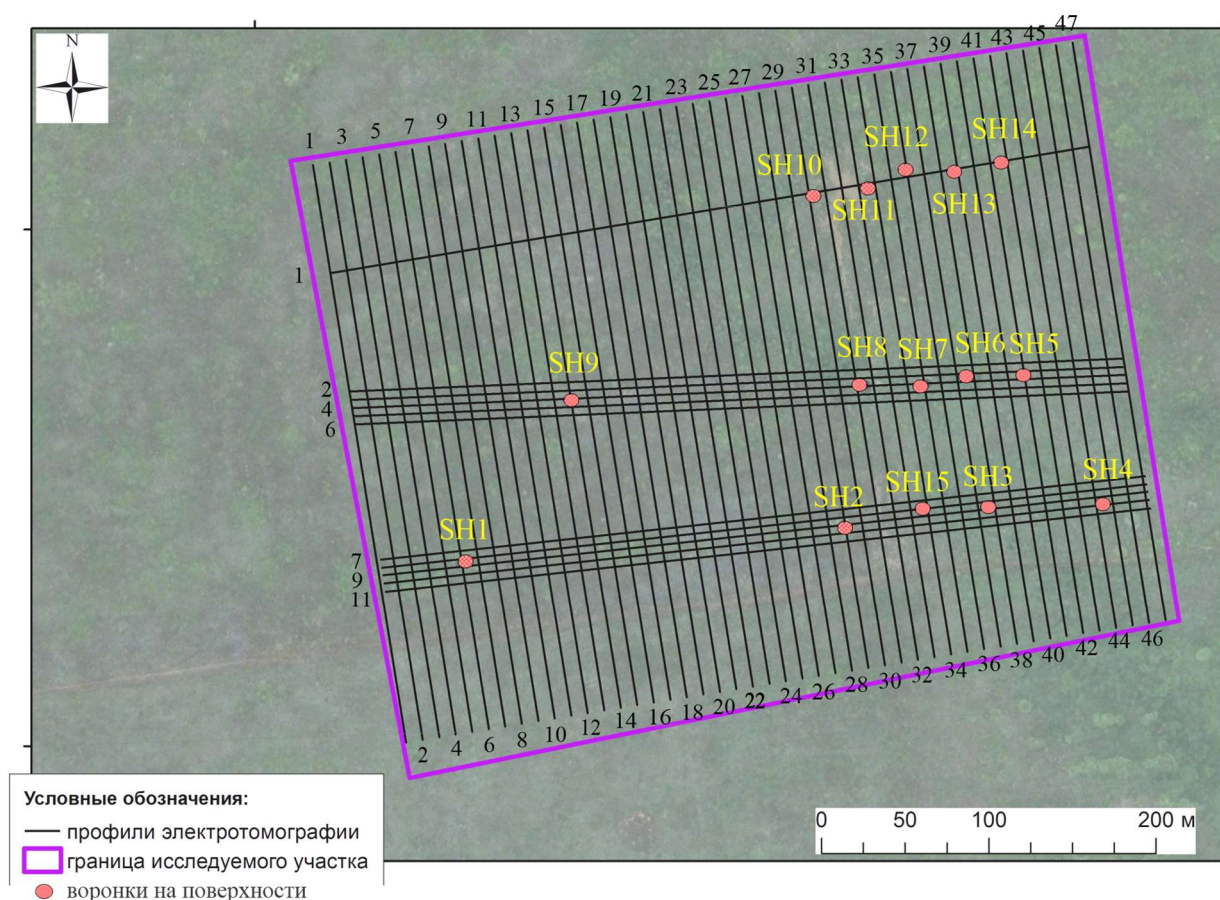


Рисунок 39 – Схема размещения профилей ЭТ и суффозионных воронок. Нумерация меридиональных профилей выполнена с запада на восток.

После обработки и интерпретации полученных полевых измерений ЭТ построены геоэлектрические разрезы по каждому профилю [Шалагинов и др., 2019]. Двумерная инверсия проведена с использованием программы Res2DInv. Погрешность подбора составила в среднем не более 12%. В качестве одного из примеров интерпретации показан результат инверсии данных ЭТ - разрез по профилю 34 (Рисунок 40).

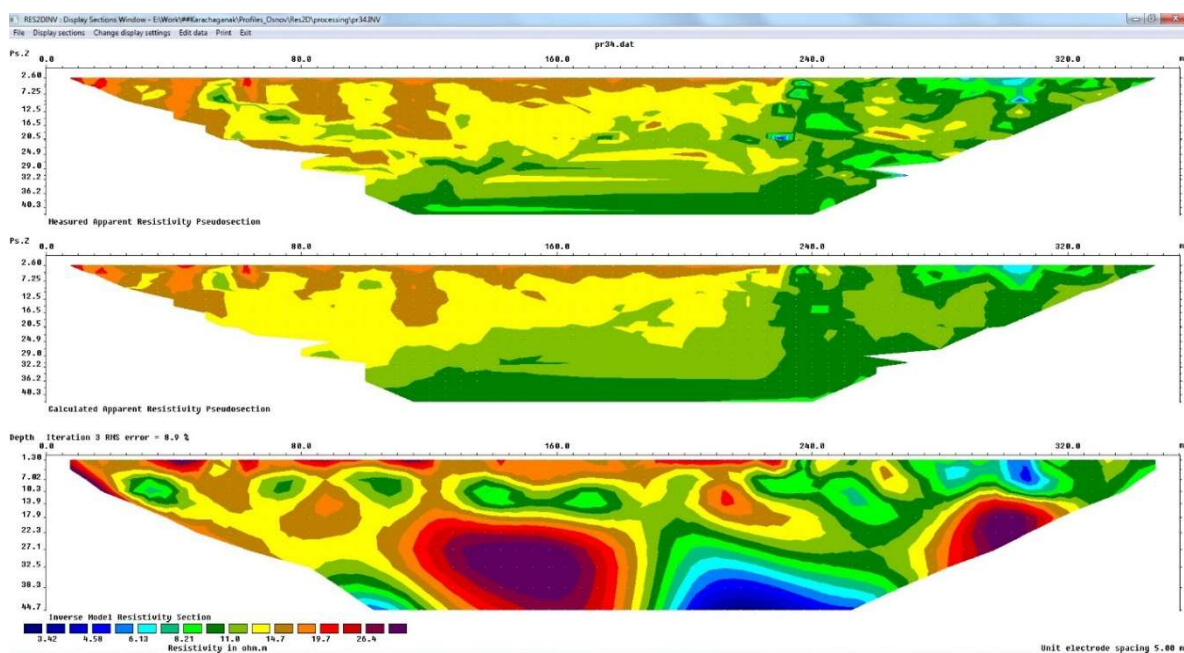
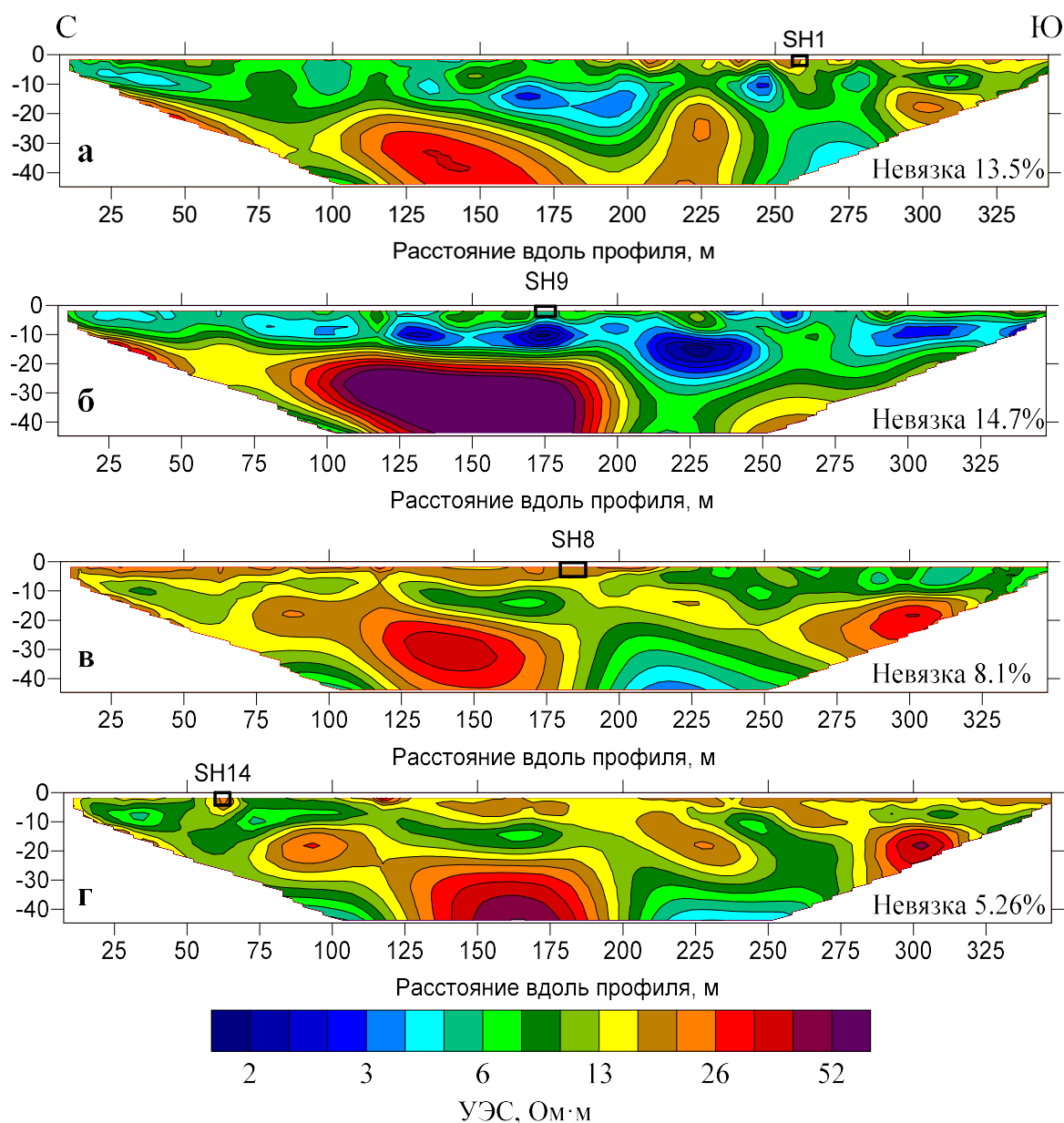


Рисунок 40 – Геоэлектрический разрез по данным электротомографии с использованием программы Res2DInv (профиль 34). В верхней части показаны разрезы измеренного и рассчитанного кажущегося УЭС.

На рисунке 41 показаны геоэлектрические разрезы по нескольким профилям, проходящих с севера на юг через воронки, по результатам инверсии данных (программе Res2DInv). На разрезах отмечены воронки, через которые проходят соответствующие профили.



разрез по профилю 4, проходящий через воронки SH 7, 8, 9, а рисунке 42б - геоэлектрический разрез по профилю 9, проходящий через воронки SH 1, 2, 3.

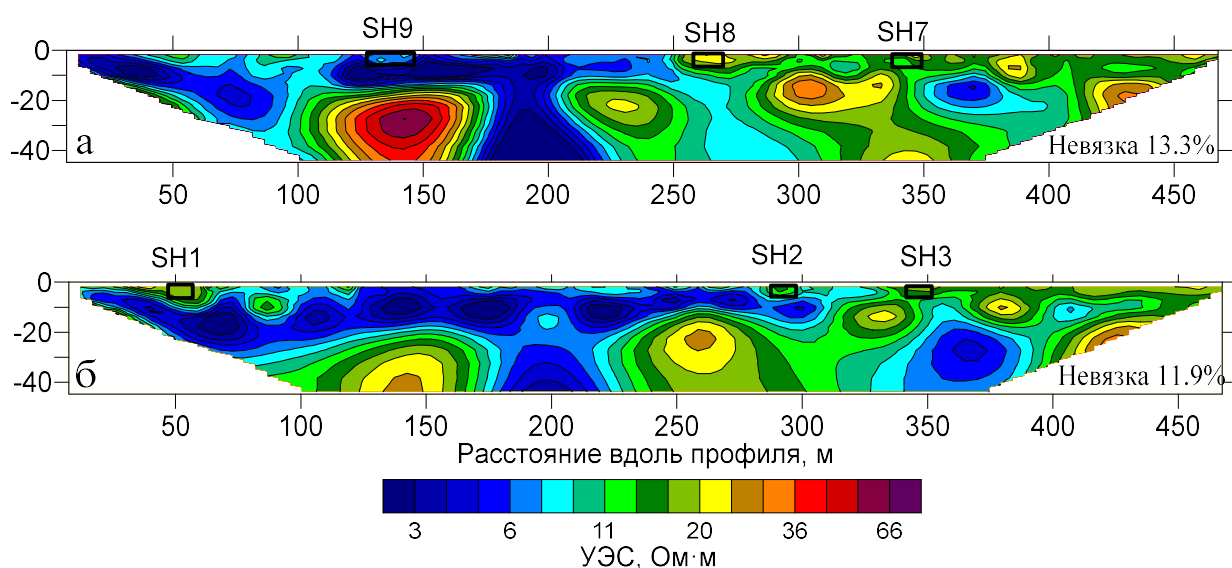


Рисунок 42 – Геоэлектрические разрез по широтным профилям 4 (а) и 9 (б).

На геоэлектрических разрезах по профилям 4 и 9 видны чередующиеся зоны повышенных и пониженных значений УЭС, что подтверждает сложность строения верхней части разреза участка исследования.

С помощью программы ZondRes2D произведена инверсия всего объема данных, полученных по широтным и меридиональным профилям. Затем с использованием программы Voxler была визуализирована трёхмерная геоэлектрическая модель с глубиной до 40 м. Для иллюстрации протяженных аномалий выбрана изоповерхность на уровне 25 Ом·м (показана зелёным цветом на рис. 9), где выделяются вытянутые с запада на восток (полосчатые) чередующиеся зоны высокого и низкого УЭС, к которым приурочены воронки (Рисунок 43). Воронки показаны с цветовой гаммой, отражающей их объемы.

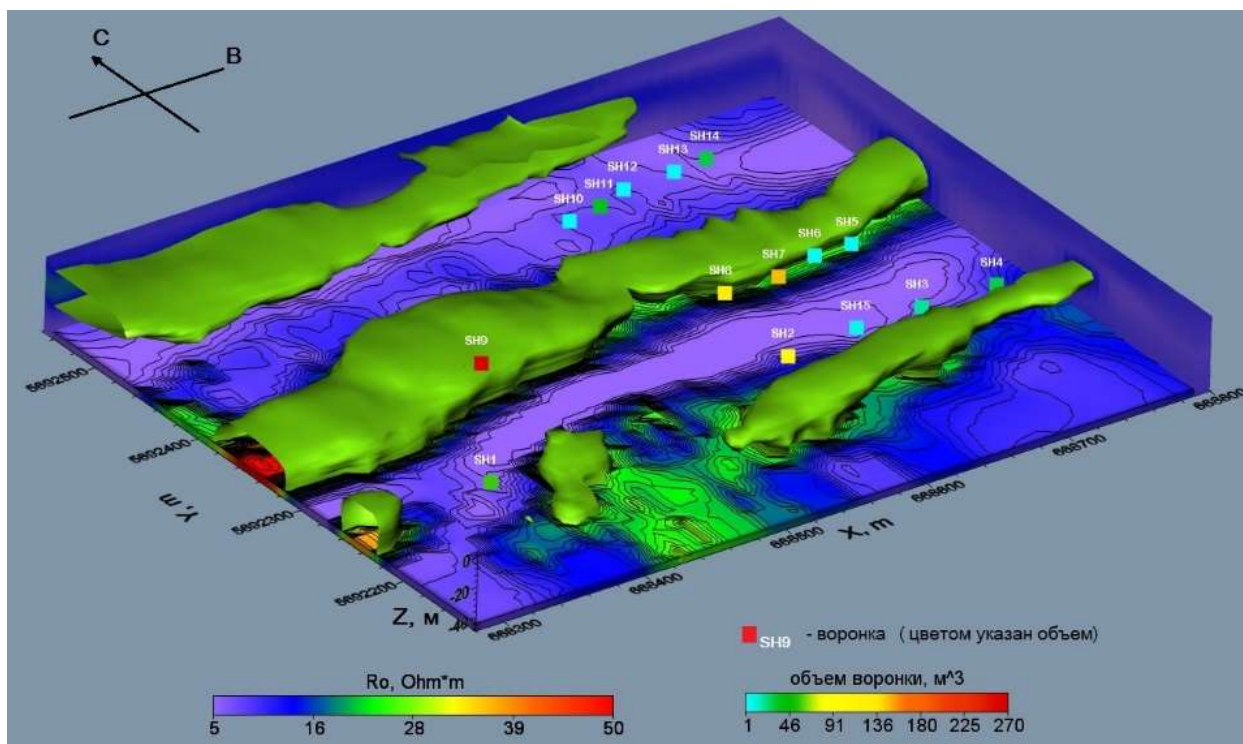


Рисунок 43 – Геоэлектрическая 3D модель по данным ЭТ. Зелёным цветом показаны высокоомные протяженные зоны (изоповерхности 25 Ом·м) [Шалагинов и др., 2019].

На участке исследования всего обнаружено 15 воронок. Одной из особенностей их размещения является приуроченность значительного числа воронок (10 из 15) к контакту протяженных проводящих и более высокоомных зон, начиная с глубин в 15-20 м. Самые северные 5 воронок расположены в пределах низкоомной зоны. Эта особенность подтверждается на горизонтальных срезах трёхмерной модели, построенных для разных глубин (6, 12, 18 и 24 м).

Из анализа срезов распределения УЭС по площади (Рисунки 44, 45), можно сформулировать закономерности этого распределения. По полученным срезам видно, что воронки, расположенные в юго-восточной части участка, находятся на границах низкоомными и более высокоомных зон. Скорее всего, эти протяженные высокоомные зоны являются ограничивающим фактором в развитии суффозионных процессов. Вдоль них и происходило вымывание известнякового и солевого «цемента», что привело к депрессии приповерхностного горизонта до глубин порядка 15-30 метров с последующей

просадкой приповерхностных грунтов.

На срезе на глубине 6 м (Рисунок 44) на севере участка исследования выделяется зона относительно повышенных значений УЭС (около 25 Ом·м). Воронки SH 1, 2, 9 расположены в зоне наиболее низких значений УЭС- от 5 до 8 Ом·м; остальные воронки относятся к области с УЭС ~ 10-15 Ом·м.

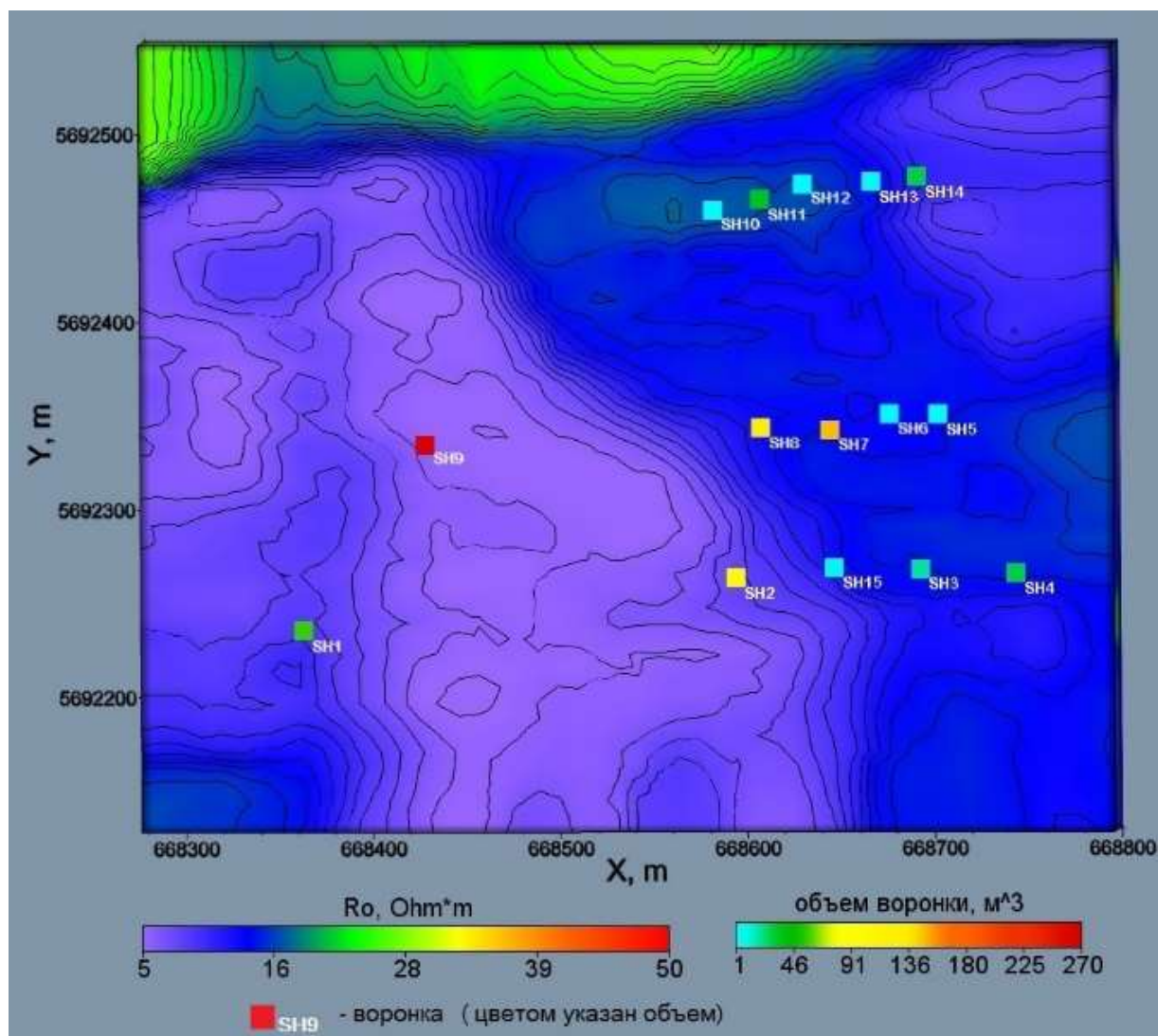


Рисунок 44 – Срез трёхмерной модели на глубине 6 м по данным электротомографии.

На срезе на глубине 12 м (Рисунок 45) довольно четко выражены зоны повышенного УЭС под восточными группами воронок. Вероятно, воронки SH1 и SH9 стоит рассматривать отдельно, так как на этой глубине под ними нет зон повышенного УЭС.

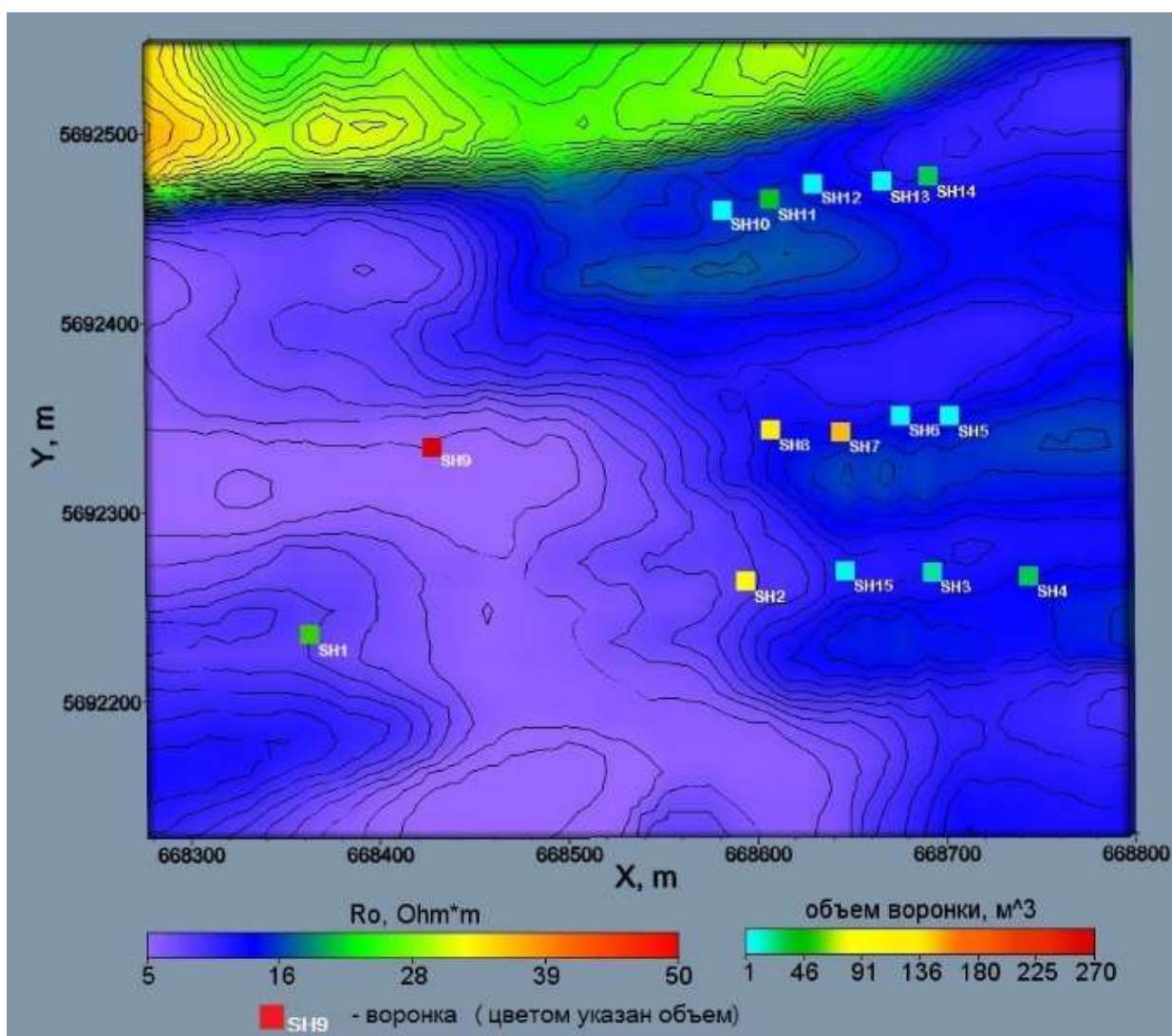


Рисунок 45 – Срез трёхмерной модели по данным электротомографии на глубине 12 м.

На срезах на глубинах 18, 24 и 30 м (Рисунки 46, 47, 48) зоны повышенного УЭС выражены наиболее сильно. Сами же воронки в свою очередь расположены либо между зонами повышенного УЭС (воронки SH10-SH14), либо на границах повышенного и пониженного УЭС (SH2-SH9, SH15) по всей глубине ниже 6 м. Воронка SH9 располагается таким же образом, но с глубины 18 м. Примечательно, что высокоомные зоны проявляются для отдельных групп воронок на индивидуальной глубине. Воронка SH1 выделяется тем, что не подходит ни в одну из вышеописанных категорий. Высокоомные зоны под воронками наблюдаются в интервале глубин от 15 до 40 м.

Наиболее высокие значения УЭС и самые большие размеры аномалии приурочены к воронке SH9, которая является самой крупной на участке работ.

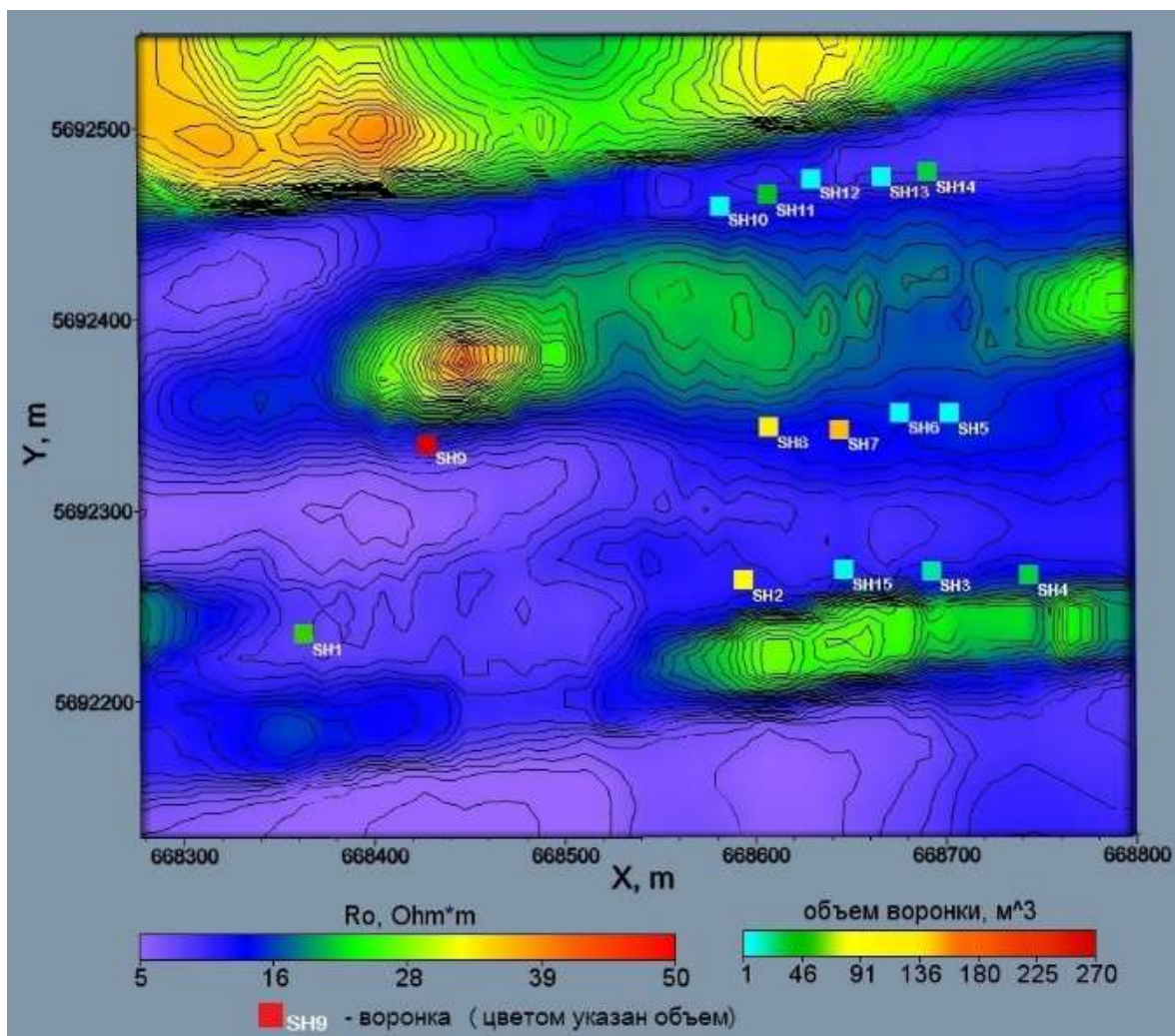


Рисунок 46 – Срез трёхмерной модели по данным электротомографии на глубине 18 м.

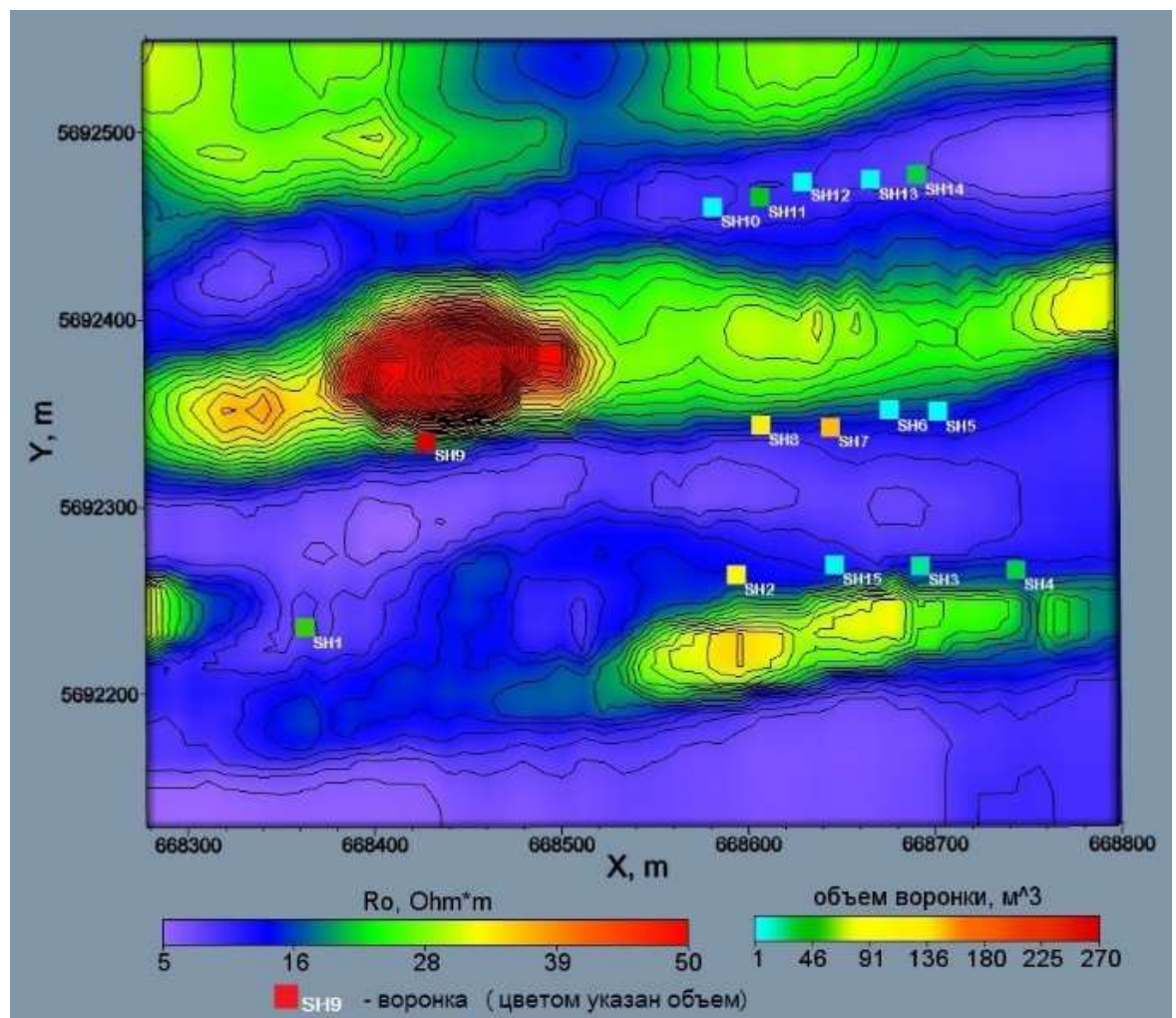


Рисунок 47 – Срез трёхмерной модели по данным электротомографии на глубине 24 м.

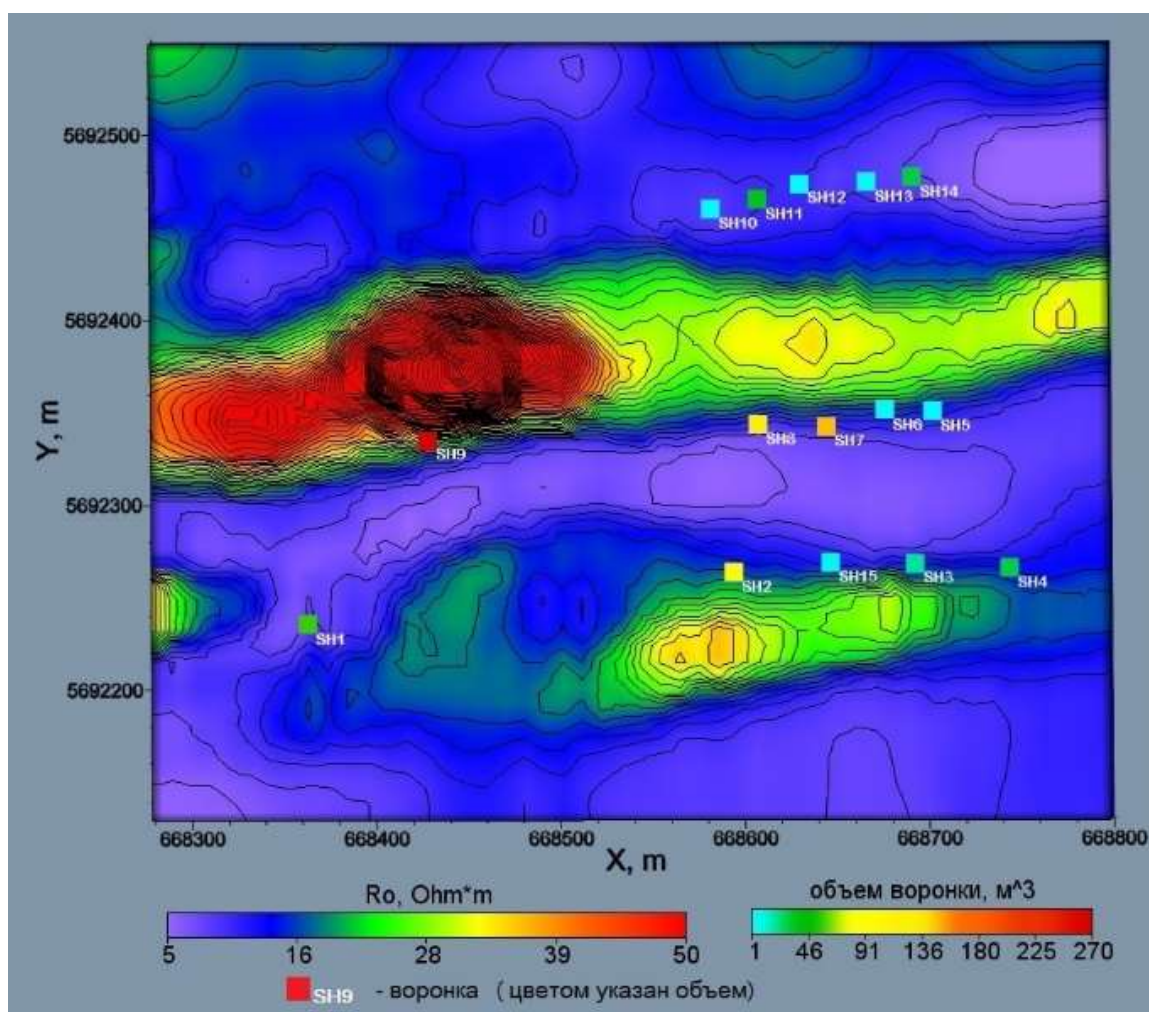


Рисунок 48 – Срез трёхмерной модели по данным электротомографии на глубине 30 м.

Для уточнения строения воронок в самой верхней части разреза был выбран участок размером 48x26 м в центре которого расположена воронка SH8. На нем были выполнены измерения по 6 параллельным профилям простиранием с севера на юг, часть профилей проходила непосредственно через воронку. Расстояние между профилями составляло 1 м, шаг между электродами - 1 м, использовалась установка Шлюмберже (Рисунок 49, б).

Такая детальная съемка позволяет построить 3D модель участка, чтобы проследить распределение геоэлектрических параметров как в зоне воронки, так и за её пределами. Глубинность исследования в геоэлектрических условиях участка составила 9 м. Трёхмерная инверсия данных проводилась с использованием программы ERTLab.

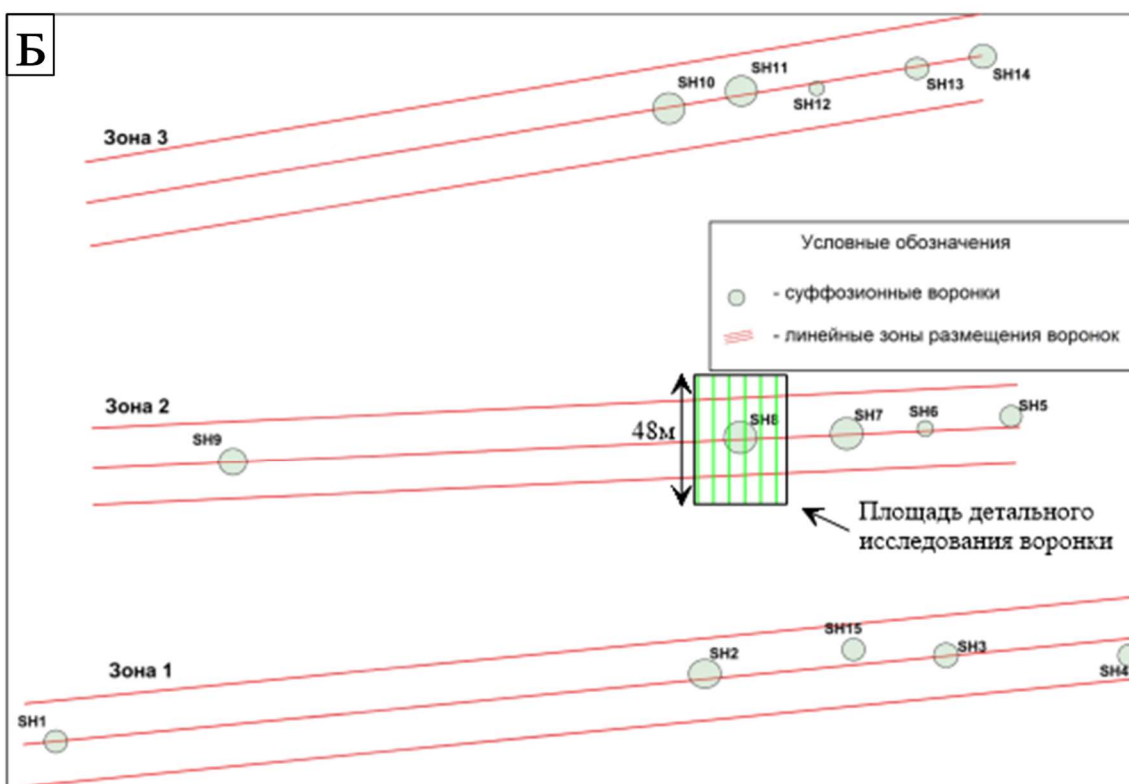


Рисунок 49 - А – фотография воронки SH9 на территории исследования; Б - Схема расположения суффозионно-просадочных образований и детальных измерений ЭТ на участке (48х26м) с воронкой SH8.

Геоэлектрический разрез по 40-метровому профилю, проходящему через

центр воронки SH8, отражает распределение УЭС по глубине и простираию (Рисунок 50). Чёрным контуром отмечена зона с относительно повышенным УЭС непосредственно под воронкой (разуплотненная зона), а белой пунктирной линией околтурена зона пониженных сопротивлений, расположенная глубже. Отчетливо видно, что распределения УЭС референтной зоны (за пределами воронки) и под воронкой существенно отличаются, горные породы, подстилающие воронку, более неоднородны и низкоомны.

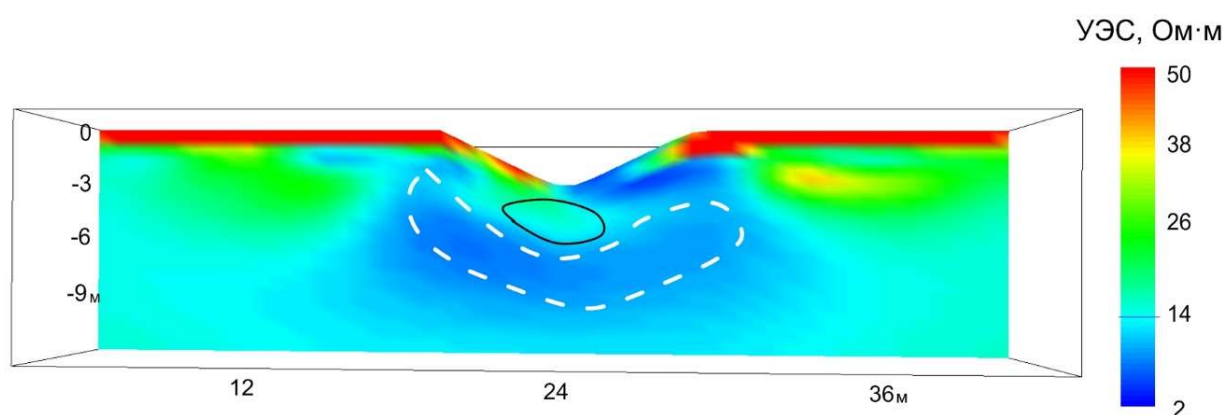


Рисунок 50 - Геоэлектрический разрез по профилю, проходящему через центр воронки SH8 [Шапаренко, Неведрова, Шалагинов, 2018].

На разрезе выделяется верхний горизонт мощностью до 30-40 см, отнесенный к почвенному слою, с самыми высокими значениями УЭС.

На рисунке 51 показан результат 3D инверсии полевых данных по плотной сетке на участке с воронкой SH8. Трёхмерная модель и горизонтальные срезы хорошо отражают отличия в геоэлектрическом строении воронки и вмещающей среды [Шапаренко, Неведрова, Шалагинов, 2018].

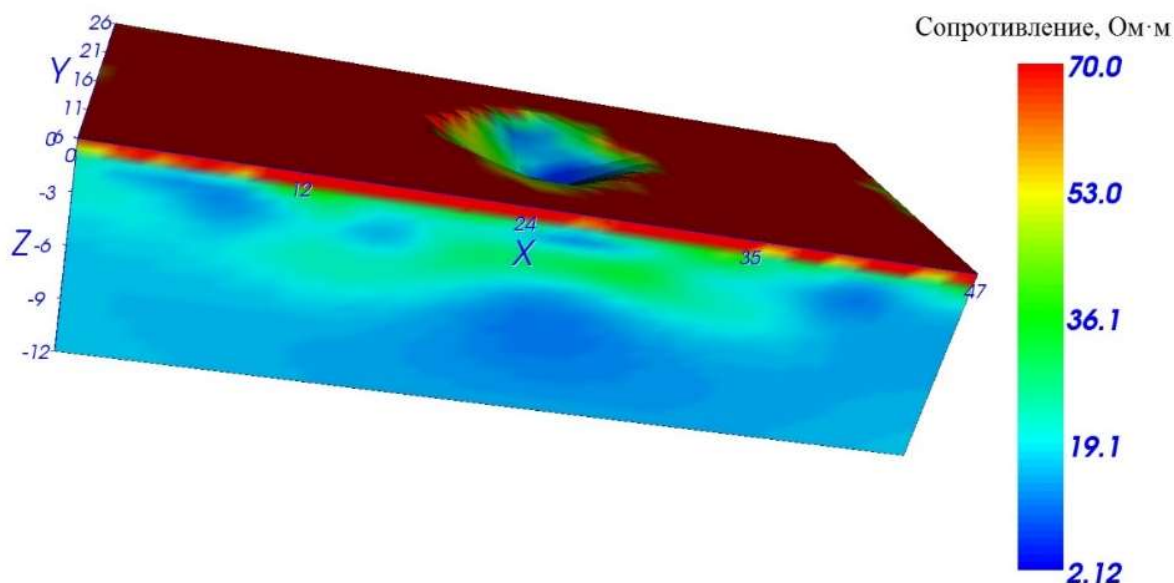


Рисунок 51 – Трёхмерная модель участка с воронкой SH8 в результате 3D инверсии полевых данных. Инверсия и визуализация проведены с помощью программы ERTLab.

Трёхмерная геоэлектрическая модель построена до глубины 9 м. Полученные результаты детальных измерений на участке с воронкой SH8 характеризуют распределение УЭС на разных глубинах.

На горизонтальных срезах 3D модели на глубинах 1.5, 3.5 и 5.5 м показано детальное распределение УЭС непосредственно в зоне воронки и во вмещающей среде за ее пределами (Рисунок 52). Белым цветом выделена зона отсутствия данных, так как глубина воронки составляет более 1.5 м.

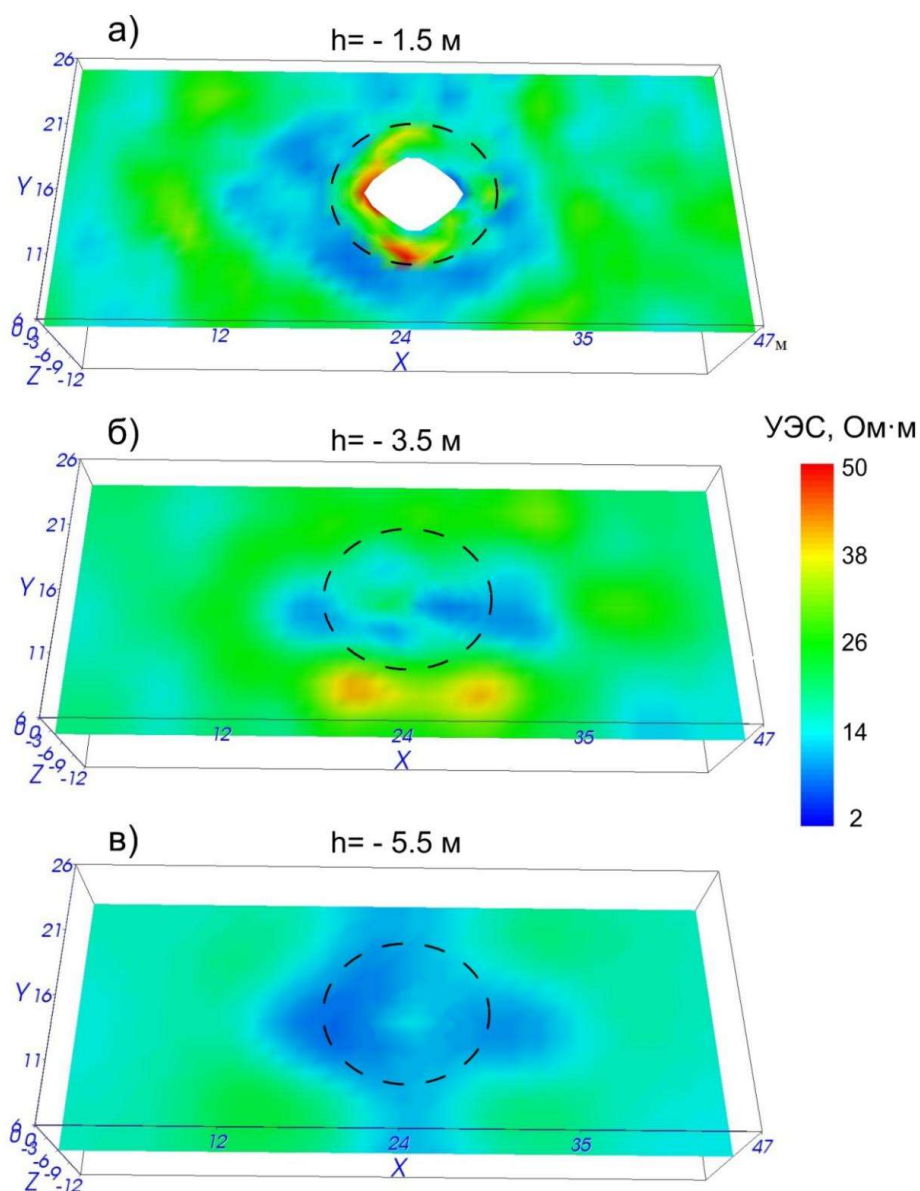


Рисунок 52 – Горизонтальные срезы 3D модели участка с воронкой SH8 с распределением УЭС на разных глубинах: а) $h = -1.5$ м; б) $h = -3.5$ м; в) $h = -5.5$ м. Пунктиром показано примерные контуры исследуемой воронки.

Примечательно, что с увеличением глубины под воронкой наблюдается зона пониженных значений УЭС относительно вмещающих пород. Кроме того, на срезах на глубине 3.5 и 5.5 м непосредственно под воронкой, в центральной части, выделяется небольшая аномалия повышенных значений УЭС, что скорее всего, связано с разуплотнением грунта. Однако на глубине 6 м эта аномалия в центре исчезает (Рисунок 52). В целом видно, что зона воронки выделяется пониженными значениями УЭС вплоть до максимальной

глубины исследования (9 м) с небольшой зоной повышенного УЭС в самом центре воронки.

Так как кроме метода электротомографии на участке исследования выполнены измерения двумя методами постоянного и переменного тока, имеющие разную глубинность исследования: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электромагнитное зондирование становлением поля (ЗСБ), их результаты были привлечены для сопоставления с данными ЭТ.

В результате анализа, обобщения и согласования геоэлектрических моделей, полученных по данным каждого метода геоэлектрики, построены модели, характеризующие в целом строение участка исследования. Обобщенная модель от дневной поверхности до глубины 40 м построена по данным электротомографии, до глубины 120 м по данным ВЭЗ и строение самых глубинных горизонтов до 500 м определено по данным ЗС.

В приповерхностной части геоэлектрической модели по малоглубинным данным электротомографии выделено чередование протяженных аномальных высокоомных и низкоомных зон на глубинах от 15 до 40 м, представленных отложениями неоген-четвертичного (N-Q) возраста. Высокоомные зоны по геологическим данным могут быть представлены либо более плотными малообводненными грунтами, либо более разуплотненными породами из которых произошло вымывание глиняного и солевого «цемента», УЭС которых изменяется от 25 до 50 Ом·м.

В свою очередь низкоомные зоны представлены более обводненными породами с УЭС ~ 5-10 Ом·м. Суффозионные воронки находятся на контакте высокоомных и низкоомных зон, либо непосредственно в более низкоомной зоне (воронки SH 10-14). Можно сделать вывод, что эти аномальные высокоомные протяженные зоны являются ограничивающим фактором развития суффозионных процессов, т.е. вдоль этих зон происходило вымывание растворимых отложений в глубину. Слои верхней части разреза неоген (N) четвертичных (Q) отложений, залегают с заметным несогласием на подстилающих горизонтах.

Далее на глубине от 40 до 80 м в западной части участка и от 40 до 200 м в его восточной части по данным ВЭЗ выделяются ещё более низкоомные горизонты с уровнем УЭС от 3 до 7 Ом·м, которые соотносятся с породами меловой (К) и юрской (J) систем. Такие геоэлектрические горизонты сложены породами глинистых и известняковых фракций с высоким уровнем минерализации подземных вод. По этим обводненным горизонтам как раз и происходила разгрузка сбросовых вод из водохранилища (рисунок 53).

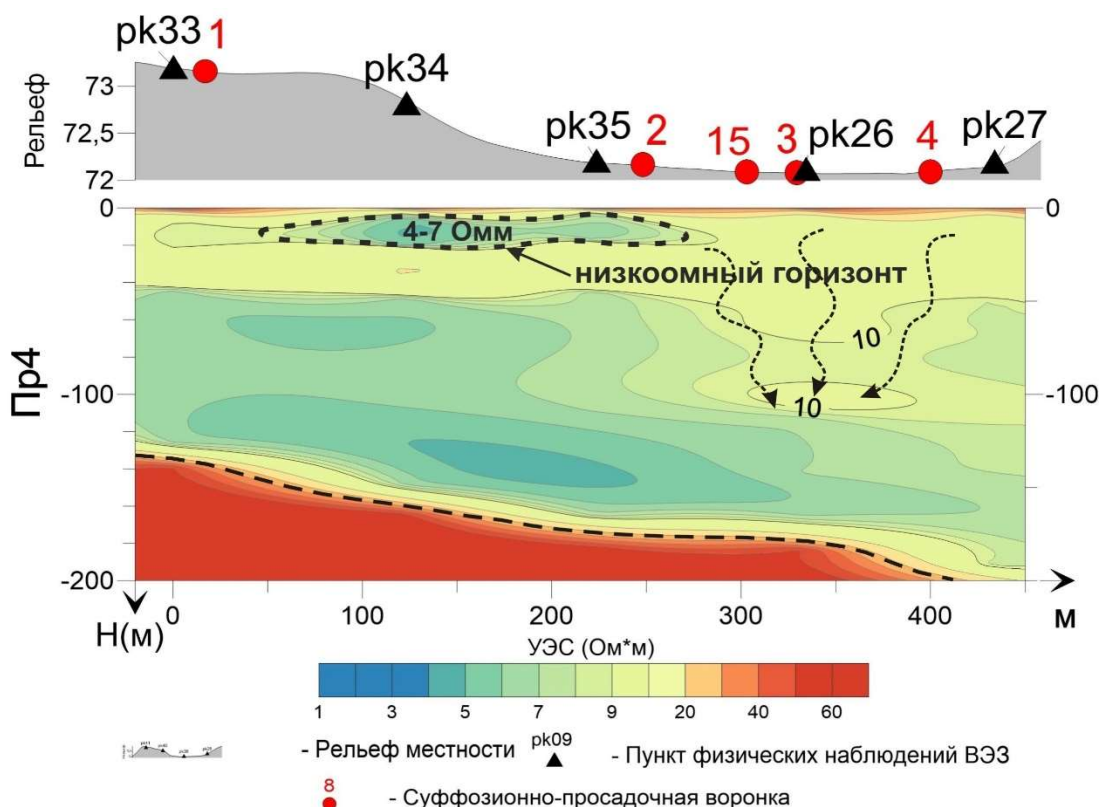


Рисунок 53 – Геоэлектрический разрез с рельефом местности по профилю ПР 4 с размещением суффозионных воронок. Метод ВЭЗ.

Ниже по разрезу, как по данным ВЭЗ, так и по данным ЗСБ, четко прослеживается тенденция погружения кровли горизонта с повышенным значением УЭС до 20-50 Ом·м, представленного по геологическим данным уплотненными породами глинистой фракции триасового возраста (Т) в интервале глубин до кровли от 80 метров в западной части участка до 300 метров в его восточной части. Мощность горизонта по разрезу постоянна и составляет ~ 300 м. В процессе вымывания растворимых частиц в вышележащих слоях этот высокоомный горизонт являлся водоупорным, вдоль

него происходил сток сбросовых вод вниз по склону.

В западной части участка по данным двух пунктов ЗСБ ПК 1 и ПК 2, под высокоомными отложениями триасового возраста, отмечено появление низкоомного интервала ($УЭС \sim 6-7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) на глубинах 400-500 метров, обусловленного наличием проводящих горных пород в кровле соляного купола (рисунок 54).

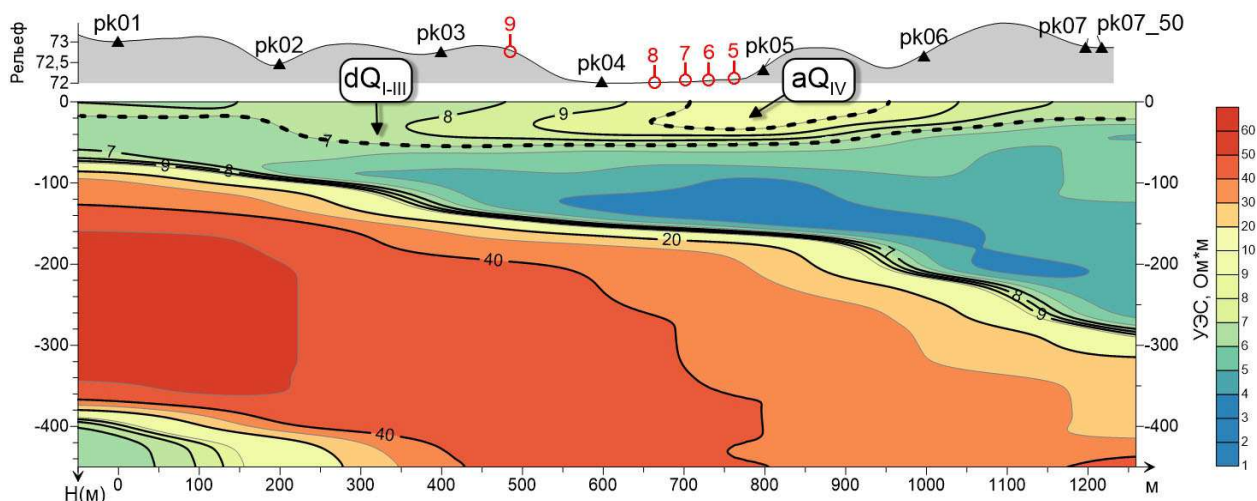


Рисунок 54 – Геоэлектрический разрез с рельефом местности по профилю ПР 1 и размещением суффозионных воронок. Метод ЗСБ.

Таким образом, по данным ЗСБ в западной части, где кровля купола расположена ближе всего к дневной поверхности, удалось определить геоэлектрические параметры его верхней части. Согласно геологическим данным на восток происходит погружение соляного купола, что полностью согласуется и подтверждено результатами интерпретации данных ЗСБ.

Трёхмерная визуализация геоэлектрического строения основных структур, связанных с процессом развития суффозионно-просадочных процессов на исследуемом участке, представлена на рисунке 55. Красным пунктиром указано направление стока вод вдоль кровли триаса, а черными стрелками траектория сброса воды в отложения мелового и юрского возраста.

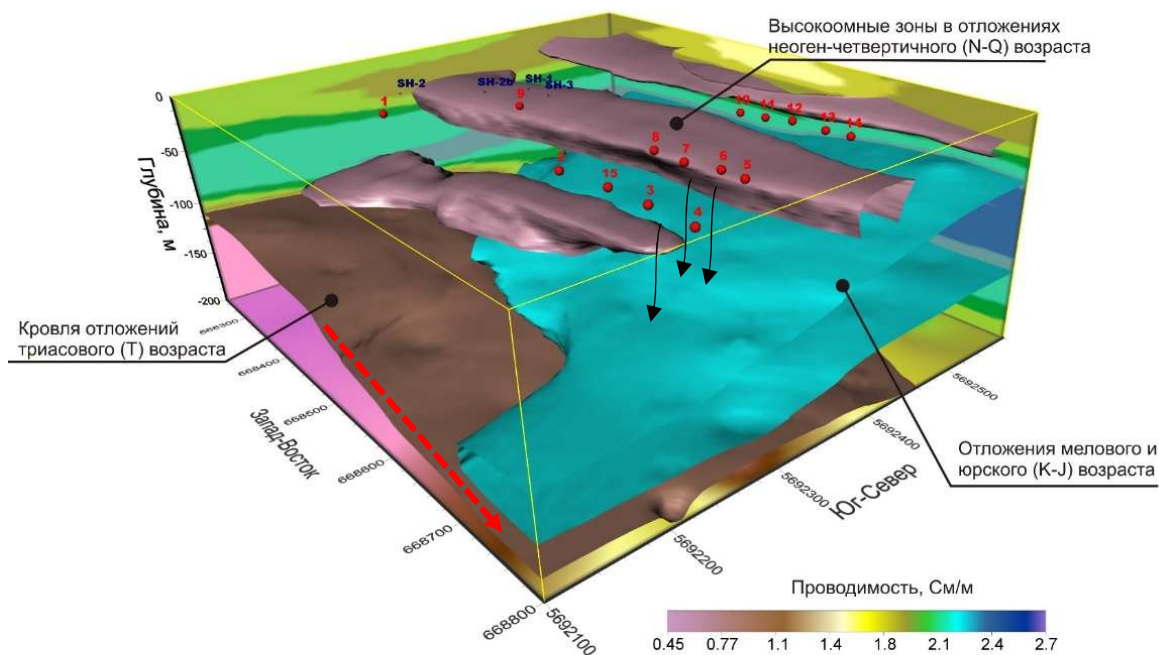


Рисунок 55 – Пространственная визуализация геоэлектрического строения участка по данным ЭТ, ВЭЗ и ЗСБ.

Суффозионные воронки на участке исследования можно разделить на две группы, и для каждой из групп предполагается свой механизм образования.

Для первой группы воронок – воронки SH2-SH8, SH10-SH15 – расположенных в зоне пониженных значений абсолютных высотных отметок, соответствующих руслу сброса вод из водохранилища, основной механизм образования связан с разгрузкой сбросовых вод в подстилающие низкоомные горизонты меловой (К) и юрской (J) систем. Вклад инфильтрации атмосферных осадков и талых вод менее значимы.

Одной из причин возникновения суффозионных процессов является искусственное нарушение режима подземного потока. На участке исследования нарушение гидрогеологического режима связано с постройкой гидротехнических и др. сооружений. Например, открытый водоотлив из котлованов часто вызывает такое увеличение скорости движения потока подземных вод, что он приводит к выносу частиц из грунта [Гришин М. М., 1962].

На участке исследования в 1950-1960 гг. прошлого столетия в русле одной из балок было создано водохранилище, которое расположено южнее участка проявления суффозионных явлений. В приплотинной зоне его левого борта выполнено водоотводное сооружение для сброса излишков воды из водохранилища по сухому логу в понижение, к которому и приурочены суффозионные провалы. Таким образом, возникший новый поверхностный водоток вместе с участками разливов сбросовых вод в его устье, вероятнее всего, стал фактором интенсивного увлажнения суглинистых просадочных грунтов естественного сложения, и его продолжительное воздействие и вызвало активизацию суффозионно-просадочного процесса на исследуемом участке.

Линейное расположение этой группы воронок связано с выявленными высокоомными протяженными аномалиями в приповерхностной части разреза, совпадающими по азимуту с направлением распределения воронок (рисунок 42). Поскольку, по геологическим данным, участок исследования расположен на границе III надпойменной террасы р. Илек и делювиального склона в тыловой закраине, возможно эти аномальные высокоомные зоны связаны с особенностями формирования отложений на этой границе.

Таким образом, при периодических сбросах из водохранилища, вода вымывала из приповерхностных неоген-четвертичных (N-Q) отложений глиняный и солевой «цемент», а выявленные более высокоомные зоны в этих отложениях задавали направление вымывания. Затем происходила разгрузка сбросовых вод в подстилающие низкоомные горизонты меловой (K) и юрской (J) систем, и далее по склону эти воды уходили на глубину. Поэтому образование данных воронок происходило быстрее всего и в настоящее время рост этих воронок не наблюдается. Сейчас влияние инфильтрации атмосферных осадков и талых вод не приводит к росту данных воронок, так как деструктивные процессы без дополнительного притока пресной воды закончены и в подстилающих породах, контролирующих данные воронки, сохраняется устойчивая гидрологическая ситуация.

Несколько другой механизм образования воронок SH1 и SH9. Они находятся вне основного русла сброса вод, поэтому можно предположить, что основной вклад в вымывание цементирующих компонент грунтов верхней части разреза происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и талых вод в подстилающие низкоомные горизонты меловой (К) и юрской (J) систем. По-видимому, воронки SH1 и SH9 должны иметь более длинный временной интервал формирования. По результатам анализа геоэлектрических моделей среды участков с этими двумя воронками, можно с достаточной долей уверенности предположить, что процесс их формирования еще не закончен. Визуальный осмотр воронок подтверждает этот вывод. У воронки SH9 наблюдаются крутые края, не полностью сформировавшийся поверхностный покров. Для воронки SH1 таких внешних факторов не отмечено, что возможно объясняется более медленной скоростью деструкции.

Выводы

В приповерхностной части геоэлектрической модели участка исследования с 15 суффозионными воронками по данным ЭТ выделено чередование протяженных высокоомных и низкоомных зон, представленных отложениями неоген-четвертичного возраста и выделенных на глубинах от 15 до 40 м. Высокоомные зоны с УЭС от 25 до 50 Ом·м по геологическим данным, могут быть соотнесены либо с более плотными малообводненными грунтами, либо с разуплотненными породами из которых произошло вымывание глиняного и солевого «цемента». В свою очередь низкоомные зоны представлены более обводненными породами с УЭС ~ 5-10 Ом·м. Суффозионные воронки SH1, SH10-14 находятся непосредственно в низкоомной зоне, а воронки SH5-9, SH2-4, SH15 - на контакте высокоомных и низкоомных зон.

Наиболее высокоомные протяженные отложения фактически являются ограничивающим фактором в развитии суффозионных процессов. С большой долей вероятности можно считать, что вдоль них и происходило вымывание

растворимых отложений в глубину. Это привело к депрессии подповерхностного горизонта до глубин порядка 15-30 метров с последующей просадкой грунтов. Поскольку, по геологическим данным участок исследования расположен на границе надпойменной террасы и делювиального склона, чередование высокоомных и низкоомных зон, скорее всего связано с особенностями формирования отложений на этой границе. Неоген-четвертичные слои верхней части разреза залегают с заметным несогласием на подстилающих горизонтах.

Детальные измерения, выполненные на участке с воронкой SH8, позволили определить распределение УЭС на разных глубинах, выявить отличия в геоэлектрическом строении горных пород непосредственно в зоне деструкции и вне её в ближайшем окружении. В горных породах, подстилающих воронку, выделяется небольшая относительно высокоомная зона (УЭС порядка 15-20 Ом·м), соответствующая разуплотнению грунтов. Глубже наблюдается понижение значений УЭС до 10 - 5 Ом·м. Значения УЭС более высокоомных горных пород референтной зоны (на некотором расстоянии от воронки) составляет 15 - 30 Ом·м.

Геологическая среда непосредственно под воронкой отличается по УЭС от вмещающей среды. Предположительно, это связано с выносом минеральных частиц, что обуславливает последующее образование провалов.

Заключение

Исследование основано на обработке и интерпретации полевых измерений ЭТ, численном решении соответствующих прямых и обратных задач с привлечением современных программных средств, а также анализе результатов ВЭЗ, ЗСБ, априорной геологической и гидрогеологической информации. Полевые работы выполнены в трёх крупных впадинах Горного Алтая и в области их перехода к горному обрамлению, а также над нефтегазоконденсатной залежью в Прикаспийской впадине (Казахстан).

Выявлены ранее неизвестные структурные характеристики участков с разломными зонами на территории крупных Алтайских впадин и получены их геоэлектрические параметры. Разломные зоны в целом выделяются значимым понижением УЭС относительно вмещающих пород, на которое влияет ряд факторов: наличие многолетней мерзлоты; изменение гидрологического и сейсмического режимов в пределах исследуемой территории. Можно отметить, что для каждого конкретного участка существует характерный диапазон значений УЭС и ширины соответствующего разломного нарушения, которые могут существенно различаться между собой. Для Чуйской впадины в районе р. Мухор значения УЭС изменяются от 150 до 300 Ом·м при средней ширине зоны около 50 м; в долине р. Чаган (п. Бельтир) значения УЭС достигают 1500 Ом·м (из-за присутствия мерзлоты) при средней ширине около 150 м. На южном склоне Курайского хребта среднее значение УЭС слабо варьируется около величины 20 Ом·м из-за литологического состава горных пород при средней ширине зоны около 40 м. В Уймонской впадине значения УЭС в зоне разлома также низкие – до 20 Ом·м при средней ширине зоны в 40 м. Это связано с наличием множества родников, приводящих к повышенной заболоченности территории.

В результате проведенного исследования на участке с суффозионно-просадочными воронками построена его детальная пространственная (трёхмерная) геоэлектрическая модель. Характерной чертой строения

является чередование протяженных низкоомных и более высокоомных аномальных зон, простирающие которых по азимуту совпадает с линейным расположением суффозионных воронок. Высокоомные протяженные зоны, скорее всего, являются ограничивающим фактором развития суффозионных процессов, вдоль этих зон происходит нарастание процессов вымывания глиняного и солевого цементирующего материала с глубиной. Это привело к депрессии подповерхностных отложений до глубин от 15 до 30 м с последующей просадкой приповерхностных грунтов. Полосчатое строение по результатам ЭТ связано по геологическим данным с особенностью формирования отложений речной террасы, в пределах которой расположены воронки, и с направлением движения поверхностных водных потоков, включая сбросы из искусственного водохранилища. Кроме того, по данным ЭТ выявлены опасные развивающиеся воронки.

В перспективе продолжения работы по тематике диссертации планируется создание базы данных потенциально сейсмогенных разломов на территории Алтайских впадин (Чуйской, Уймонской, Курайской) с их характерными значениями геоэлектрических параметров. База данных будет зарегистрирована и доступна для научного сообщества.

Будут опробованы возможности трёхмерного численного решения прямых и обратных задач ЭТ для более реалистичных геоэлектрических моделей разломных структур (будут изменяться значения УЭС перекрывающего слоя и блоков вмещающей среды).

Кроме того, для более полной верификации результатов интерпретации данных ЭТ планируется привлечь лабораторное физическое моделирование с уже имеющимся техническим оборудованием и физическими моделями с имитацией разломных структур, опробованных при проведении первых экспериментов.

Литература

1. Аникеев А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. – 2006. – № 6. – С. 544–553.
2. Аникеев А.В., Леоненко М.В. Прогноз провалообразования при изменении гидродинамического режима на примере Дзержинского карстового района // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 2. – С. 130-146.
3. Бабушкин С.М., Егоров А.Н., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Результаты поисково-разведочных работ на полиметаллы методами электроразведки с контролируемыми источниками в районе Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – №. 11. – С. 97-110.
4. Балков Е. В. Комбинирование установок электротомографии //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 2. – №. 1.
5. Балков Е.В., Карин Ю.Г., Фадеев Д.И., Шапаренко И.О. Комплексирование аэрофотосъемки, электромагнитного профилирования и электротомографии для изучения древних археологических поселений и городищ Новосибирской области // Геофизика. – 2023. – №1. – с. 26-33.
6. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения электротомографии в геофизике // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54-63.
7. Барсуков О.М. О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами //Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1970. – №. 1. – С. 84.
8. Баталева Е. А., Баталев В. Ю. Магнитотеллурический мониторинг напряженно-деформированного состояния среды (для территории Центрального Тянь-Шаня) //Геолого-геофизическая среда,

- сейсмичность и сопутствующие процессы: Матер. конф. Нерюнгри: Изд-во: Технический ин-т (ф) СВТУ. – 2015. – С. 7-14.
9. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) //Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – №. 2. – С. 461-487.
 - 10.Бобачев А. А., Модин И. Н., Перваго Е. В. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред //Разведочная геофизика/Акционерное о-во закрытого типа" Геоинформмарк". – 1996.
 - 11.Бобачев А.А., Горбунов А.А, Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – №2. – С. 14-17.
 - 12.Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. №12. с. 79-90.
 - 13.Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами //Разведка и охрана недр. – 2008. – №. 1. – С. 43-47.
 - 14.Большаков Д. К., Модин И. Н. Методика многосегментных электротомографических измерений //Наука и образование в современном мире. – 2015. – №. 7. – С. 11-17.
 - 15.Великин С. А. Использование технологий 3d-обработки данных электротомографии в задачах мониторинга состояния оснований гидротехнических сооружений в криолитозоне //Геофизика. – 2019. – №. 1. – С. 25-32.
 - 16.Гохберг М. Б. и др. Электромагнитные предвестники землетрясений. – 1982.
 - 17.Гришин М.М. Гидротехнические сооружения. - 2-е изд. - М.: Гостройиздат, 1954. - 500 с.

18. Деев Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М., Бабушкин С. М., Кречетов Д. В., Ельцов И. Н., Зольников И. Д. Новые данные о строении Уймонской межгорной впадины (Горный Алтай // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – №. 1. – С. 15-23.
19. Деев Е.В., Гибшер А.С., Чигвинцева Л.А., Буряк Е.А., Рябинин А.Б. Сейсмодислокации Чуйского землетрясения 2003 года и их палеоаналоги в кайнозойской структуре Горного Алтая // Области активного тектоногенеза в современной и древней истории Земли: материалы XXXIX тектонического совещания. М., ГЕОС. – 2006. – Т. I. – с. 207—2106.
20. Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д., Русанов Г.Г., Пономарев П.В. Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 1. – С. 120-139.
21. Добровольский И. П. О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. – 2010. – Т. 11. – №. 1. – С. 35-46.
22. Достовалова 2004
23. Ермаков А. П., Скобелев А. Д., Стром А. Л., Богданов М. И., Модин И. Н., Владов М. Л. Инженерно-геофизические исследования активных тектонических разломов в Южной Якутии // Инженерные изыскания. – 2017. – №. 4. – С. 46-53.
24. Ерохин С. А. и др. Методические электротомографические исследования при археологических раскопках в селе Бородино // М.: Институт археологии РАН. – 2012. – С. 435-446.
25. Журбин И. В., Бобачев А. А., Зверев В. П. Комплексные геофизические исследования культурного слоя археологических памятников (городище Иднакар, IX-XIII вв.) // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2007. – №. 2. – С. 30.

- 26.Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А. Физические основы прогнозирования механического разрушения //Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1981. – Т. 259. – №. 6. – С. 1350-1353.
- 27.Заалишвили В. Б. и др. Мониторинг опасных геологических процессов в зоне предполагаемого Ардонского разлома и на участке трассы газопровода от сел. Дзуарикау до границы РСО-Алания //Геология и геофизика Юга России. – 2012. – №. 4. – С. 25-32. Короновский Н.В. Общая геология: учебник. М.: КДУ, 2006. – 528 с.
- 28.Зольников И.Д. Роль оледенений и гляциальных суперпаводков в геологическом строении осадочных комплексов верхней половины неоплейстоцена Горного Алтая и Приалтайской равнины. Дис. док. геол.-мин. наук. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. – 416 с.
- 29.Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Алибеков А.А., Идармачев И. Ш. Вариации кажущегося сопротивления горных пород в скважине в районе восточного кавказа в период сильных землетрясений //Геология и Геофизика Юга России. – 2013. – Т. 3. – №. 1. – С. 28-35.
- 30.Квон Д.А., Модин И.Н., Шевнин В.А., Макаров Д.В., Скобелев А.Д. Применение электротомографии для идентификации в разрезе мерзлых и охлажденных пород разной степени засоленности //Криосфера Земли. – 2019. – Т. 23. – №. 3. – С. 3-12.
- 31.Киссин И. Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений //Физика Земли. – 2013. – №. 4. – С. 145-145.
- 32.Кузина З. Я., Неведрова Н. Н., Санчаа А. М. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств //Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2023. – Т. 26. – №. 2. – С. 160-169.
- 33.Куликов В. А., Бобачев А. А., Яковлев А. Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м //Геофизика. – 2014. – №. 2. – С. 39-46.

34. Куликов В. А., Яковлев А. Г. Возможности современных электроразведочных технологий при поисках и разведке твердых полезных ископаемых // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. – 2018. – С. 705-709.
35. Куликов В.А., Бобачев А.А., Груздева И.Д., Яковлев А.Г. Межскважинная электротомография при изучении глубоко залегающего рудного тела в Норильском районе // Геофизика. – 2013. – №. 1. – С. 27-34.
36. Лукина В. Е. Мониторинг состояния окружающей среды. Нормирование качества окружающей среды. – 2002.
37. Манштейн Ю. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс] / Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. – Режим доступа: <http://www.nemfis.ru/etom.pdf>. 2009.
38. Манштейн Ю.А., Шапаренко И.О., Балков Е.В., Манштейн А.К., Карин Ю.Г., Егоров В.Е. Поиск микросфер в золотом зале методами электротомографии и электромагнитного профилирования // Инженерные изыскания. – 2015. – № 13. – С. 58-61.
39. Модуль численного трёхмерного моделирования данных метода электротомографии на графических процессорах Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017660273 от 20.09.2017 г. Авторы Суродина И.В., Фаге А.Н.
40. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Шапаренко И. О. Геоэлектрическое строение и мониторинг в зонах разломов Уймонской впадины Горного Алтая по данным комплекса электромагнитных методов // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. – 2021. – С. 238-241.
41. Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Пономарев П.В. Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г.

- (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – №1. – с. 146-165.
42. Неведрова Н.Н., Рохина М.Г., Шалагинов А.Е., Санчаа А.М. Анализ многолетних наблюдений методом нестационарного электромагнитного зондирования (на примере сейсмоактивной зоны Горного Алтая) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 12. – С. 190-212.
43. Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Пономарев П.В. Выявление разломных структур и их геоэлектрических характеристик по данным метода сопротивлений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (Горный Алтай) // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 1. – С. 146-156.
44. Неведрова Н.Н., Пономарев П.В., Санчаа А.М., Шапаренко И.О. Влияние сейсмических событий на геоэлектрические параметры многолетней мерзлоты в Горном Алтае // Литосфера. – 2025. – Т. 25. – №6. – С. 1416-1427.
45. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 31-40.
46. Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Геоэлектрическая модель разломной зоны по данным электротомографии (на примере Чуйской впадины Горного Алтая) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 4 т. – 2017. – Т. 3. – С. 127-131.
47. Новиков И. С. Морфотектоника Алтая // Геоморфология. – 2003. – № 3. – С. 10–25.

48. Новиков И.С., Поспеева Е.В. Неотектоника восточной части Горного Алтая по данным магнитотеллурического зондирования // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 7. – С. 959–971.
49. Оленченко В. В., Кучер Д. О., Бортникова С. Б., Гаськова О. Л. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – №. 4. – С. 782-795.
50. Отчет «Исследование природы образования и развития суффозионно-карстовых образований на территории Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения», 2014.
51. Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений // Геофизика. 2013. №6. С. 32-37.
52. Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений // Геофизика. – 2013. – №. 6. – С. 32-37.
53. Потапов В.В., Поспеева Е.В. Электромагнитный мониторинг методом МТЗ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 17-21 апреля 2017): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 4 т. – 2017. – Т. 3. – С. 167-171.
54. Родкин М. В. Типовая фор-и афтершоковая аномалия–эмпирика, интерпретация, применение // Вулканология и сейсмология. – 2020. – №. 1. – С. 640-76.
55. Русанов Г. Г. Разрез Чаган (Юго-Восточный Алтай): строение и реконструкция условий осадконакопления // Известия Русского географического общества. – 2011. – Т. 143. – №. 1. – С. 67-72.
56. Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Пономарев П. В. Блоковое строение южной части Курайской впадины горного Алтая по данным

- геоэлектрики в сопоставлении с распределением эпицентров землетрясений //Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 167-180.
- 57.Санчаа А. М., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О., Шалагинов А.Е., Бабушкин С.М. Геоэлектрическое строение Уймонской впадины по данным наземной геоэлектрики //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – №. 2. – С. 137-144.
- 58.Светов Б. С. Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов //Изв. вузов. Геология и разведка. – 1992. – №. 2. – С. 99-116.
- 59.Семинский К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: ГЕО, 2003. – 244 с.
- 60.Семинский К. Ж., Бобров А. А. Геоэлектрический имидж сбросовых зон: тектонофизическая интерпретация малоглубинной электротомографии на примере Бугульдейско-Чернорудского грабена в Западном Прибайкалье //Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 1339-1361.
- 61.Семинский К. Ж., Бобров А. А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов Западного Прибайкалья //Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – Т. 4. – №. 1.
- 62.Семинский К. Ж., Зарипов Р. М., Оленченко В. В. Тектонофизический подход к интерпретации данных малоглубинной электротомографии разломных зон //Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – №. 9. – С. 1715-1729.
- 63.Сергеев К. С., Рыжков В.И., Белоусов А. В., Бобачев А.А. Из опыта изучения развития обвальных и карстовых процессов методами инженерной геофизики //Инженерные изыскания. – 2016. – №. 12. – С. 26-33.
- 64.Соболев Г.А. Перспективы оперативного прогноза землетрясений по электротеллурическим наблюдениям //Предвестники землетрясений. – 1973. – №. 5498. – С. 172.

- 65.Суродин И.В, Нестерова Г.В. Моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015. Сборник статей EAGE. – 2015. – С.79-88.
- 66.Трапезников Ю.А., Волыхин А.М., Щелочков Г.Г. О результатах режимных электрических наблюдений по схеме ДЗ на Фрунзенском прогностическом полигоне //Прогноз землетрясений. – 1987. – №. 7. – С. 103-107.
- 67.Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н. Особенности геоэлектрического строения участка Мухор-Тархата в Чуйской впадине Горного Алтая по данным нестационарных зондирований и электротомографии //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 2. – №. 2. – С. 266-269.
- 68.Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н. Электромагнитный мониторинг в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г. в Горном Алтае: методика измерений, результаты //Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – №. 4. – С. 0714.
- 69.Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон [Электронный ресурс] // Geodynamics and Tectonophysics = Геодинамика и тектонофизика: Электронный журнал. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 93-107.
- 70.Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О., Бабушкин С.М. Применение методов электроразведки с контролируемыми источниками для выявления причин развития суффозионно-просадочных процессов //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 4. – С. 26-40.
- 71.Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. Результаты мониторинга разломных структур методом электротомографии в сложнопостроенных районах // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки

- месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20-24 апреля 2020 г.). – 2020. – С. 726-73.
72. Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н. Изучение строения разломных зон Горного Алтая методом электротомографии //Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященной 75-летию ИЗК СО РАН, 45-летию лаборатории тектонофизики, 90-летию со дня рождения профессора С.И. Шермана. – 2024а. – С. 133-134.
73. Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н. Возможности мониторинга на участках с разломными структурами Горного Алтая методом электротомографии // Интерэкспо Гео-Сибирь - XX Международный научный конгресс. – 2024б. – Т. 2. – №. 4. – С. 204-210.
74. Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н., Карин Ю. Г. Физическое моделирование разломных зон сейсмоактивных районов по данным электротомографии //Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Интерэкспо ГЕО-Сибирь-XIX Международный научный конгресс. Международная научная конференция: Сборник материалов в 8 т.-Новосибирск, 17-19 мая 2023.- Новосибирск: СГУГиТ. – 2023. – Т. 2. – №. 4. – С. 68.
75. Шапаренко И. О., Неведрова Н.Н., Мариненко А.В., Суродина И.В. Анализ эффективности программных комплексов электротомографии для интерпретации полевых данных в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая) //Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – №. 2. – С. 54.
76. Шапаренко И. О., Неведрова Н. Н., Шалагинов А. Е. Детальная модель типичного суффозионно-просадочного образования по данным метода электротомографии //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 4. – С. 227-232.

77. Шапаренко И.О., Егоров В.Е., Цуканов К.Г., Богданов Е.С. Исследование археологического комплекса Юго-Западного Казахстана электромагнитными геофизическими методами [Электронный ресурс] // Инженерная геофизика 2016: Тезисы докладов 12-й научно-практической конференции и выставки (г. Анапа, Россия, 25-29 апреля 2016 г.). – 2016. – С. А02.
78. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Ерохин С.А., Белушко И.И. 2D моделирование и инверсия электротомографии для обучения и изучения // 6th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. – European Association of Geoscientists & Engineers. – 2010. – P. cp-193-00068.
79. Шкиря М. С., Ланкин Ю. К., Терешкин С.А., Лазурченко А. В., Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №. 11. – С. 160-170.
80. Эпов М.И., Молодин В.И., Балков Е.В., Дядьков П.Г., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Вайсман П.А., Евменов Н.Д., Егоров В.Е., Карин Ю.Г., Колесов А.С., Кулешов Д.А., Манштейн А.К., Манштейн Ю.А., Позднякова О.А., Савлук А.В., Селезнев Д.С., Фадеев Д.И., Цибизов Л.В., Шапаренко И.О., Шеремет А.С. Археогеофизические исследования в СО РАН, 2013-2015 годы // Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы: Материалы международного симпозиума "Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы" (г. Новосибирск, 22-26 июня 2015 г.). – 2017. – С. 405-413.
81. 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. 1944-1954.
82. Яковлев В. Н., Шумакова Е. М., Трегуб Н. В. Сейсмическая активность и геодинамика Самарской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – №. 1-1.
83. Albuquerque G.M., Mansur K., Silva G., Mello C., Braga M. Fault mapping and characterization of a coastal aquifer related to a mangrove ecosystem, using electrical resistivity tomography (ERT), ground penetrating radar (GPR) and hydrochemical data: The case of the Mangue de Pedra Aquifer, Armação dos Búzios, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2022. – Т. 120. – С. 104095.
84. Arjweh R. et al. Identification and Verification of the Movement of the Hidden Active Fault Using Electrical Resistivity Tomography and Excavation // Geosciences. – 2024. – Т. 14. – №. 8. – С. 196.
85. Artugyan L., Ardelean A.C., Urdea P. GPR and ERT Investigations of Karst Structures at the Buhui-Cuptoare Cave System, Anina Karst Region (Banat Mountains, Romania) // Advances in Modeling and Interpretation in Near Surface Geophysics. – 2020. – С. 19-38.
86. Barnes H., Hinojosa J.R., Spinelli G.A., Mozley P.S., Koning D., Sproule T.G., Wilson J.L. Detecting fault zone characteristics and paleovalley incision using electrical resistivity: Loma Blanca Fault, New Mexico Fault and paleovalley resistivity // Geophysics. – 2021. – Т. 86. – №. 3. – С. B209-B221.
87. Bermejo L., Ortega A. I., Guerin R., Benito-Calvo A., Perez-Gonzales A., Pares J. M., Aracil E., Bermudez de Castro J. M., Carbonell E. 2D and 3D ERT imaging for identifying karst morphologies in the archaeological sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain) // Quaternary International. – 2017. – V. – 433, Part A. – P. 393-401
88. Caselle C., Bonetto S., Comina C., Stocco S. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – Т. 95. – С. 103137.

89. Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., Bosch F. P. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview // *Hydrogeology Journal*. – 2011. – № 19. – P. 1169-1180.
90. Cuevas Castellanos P., Shevnin V. A., Krivosheya K. V., Pavlova A. M., Ryjov A. A., Bobachev A. A. Resistivity modelling of sinkholes effects caused by karst and suffusion // *Near Surface geoscience*. – 2013.
91. Dahlin T., Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays // *Geophysical prospecting*. – 2004. – V. 52. – P. 379-398.
92. DiInSo: <http://diinso.sourceforge.net/>
93. Doetsch J., Linde N., Vogt T., Binley A., Green A. G. Imaging and quantifying salt-tracer transport in a riparian groundwater system by means of 3D ERT monitoring // *Geophysics*. – 2012. – T. 77. – №. 5. – B207-B218.
94. Faguet A., Sanchaa A. Electrical resistivity tomography and 3D numerical modeling for aquifer mapping in Novosibirsk region // *Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics: VII International Scientific Conference of young scientists and students (Baku, Azerbaijan, October 15-18, 2018): Book of Abstracts*. – 2018. – C. 81-82.
95. Festa V., Tripaldi S., Siniscalchi A., Acquafredda P., Fiore A., Mele D., Romano G. Geoelectrical resistivity variations and lithological composition in coastal gypsum rocks: A case study from the Lesina Marina area (Apulia, southern Italy) // *Engineering Geology*. – 2016. – № 202. – P. 163-175.
96. Gelis C., Noble M., Cabrera J., Penz S., Chauris H., E. M. Cushing. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France // *Pure and Applied Geophysics*. – 2016. – № 173. – P. 573-589.
97. Gelis C., Revil A., Cushing M. E., Jougnot D., Lemeille F., Cabrera J., De Hoyos A., and Rocher M. Potential of ERT to Detect Fault Zones in Limestone and Argillaceous Formations in the Experimental Platform of Tournemire, France // *Pure and applied geophysics*. – 2010. – № 167. – P. 1405-1418.

98. <https://kbelectrometry.ru/>.
99. Kumar D., Satyanarayanan M., Kumar K., Sunder Raju P.V. Electrical resistivity tomography of Mesoarchaeon chromitite bands from Katpal in Sukinda Ultramafic Complex, Odisha // *Journal of Earth System Science*. – 2022. – T. 131. – №. 1. – P. 29.
100. Labutin I. B., Surodina I. V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in the Conjugate Gradient Method // *Reliab. Comput.* – 2013. – T. 19. – №. 1. – C. 120-126.
101. Labutin I.B., Surodina I.V. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // *Reliable Computing (Interval Computations) Journal*. – 2013. – №19. – P 120-126.
102. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring: Recent advances and future directions // *Applied Sciences*. – 2022. – T. 12. – №. 3. – P. 1425.
103. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method 1 // *Geophysical prospecting*. – 1996. – T. 44. – №. 1. – C. 131-152.
104. Loke M., Chambers J., Rucker D., Kuras O., Wilkinson P. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method // *Journal of Applied Geophysics*. – 2013. – № 95. – P. 135–156.
105. Lowrie W. *Fundamental of Geophysics*. N.Y.: Cambridge University Press. – 2007.
106. Marinenko A.V. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-typical problem definition // *Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2020*. – 2020. – V 2020. - p. 1–9.
107. Martínez-García F., Colín-Cruz A., Adame-Martínez S., Ramírez-García J. J. Atypical variations of water conductivity prior to tectonic earthquakes // *International Journal of Geosciences*. – 2015. – № 6. – P. 1367-1385.

108. Musa M. D. T., Kurniawan M., Wahyu A., Mudin Y., Sandra S., Badaruddin, B. Identification of surface faults using the resistivity geoelectrical method in Dalaka Village, Donggala Regency, Central Sulawesi //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – T. 2719. – №. 1.
109. Nagaiah E., Sonkamble S., Chandra S. Electrical geophysical techniques pin-pointing the bedrock fractures for groundwater exploration in granitic hard rocks of Southern India //Journal of Applied Geophysics. – 2022. – T. 199. – P. 104610.
110. Negri S., Leucci G., Mazzone F. High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface //Journal of Applied Geophysics. – 2008. – T. 65. – №. 3-4. – C. 111-120.
111. Nevedrova N. N., Sanchaa A. M., Shaparenko I. O. Geoelectrical structure and monitoring in fault zones of Uimon depression in Gorny Altai region using electromagnetic methods //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2021. – T. 929. – №. 1. – P. 012025.
112. Nevedrova N., Babushkin S., Sanchaa A., Shaparenko I., Shalaginov A. Geoelectrical Models of Fault Zones in the Gorny Altai Region // Trigger Effects in Geosystems: The 5th International Conference, Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences. – 2019. – P. 135-144.
113. Olenchenko V.V., Osipova P.S. Electrical resistivity tomography of alluvial deposits during prospecting for placer gold //Russian Geology and Geophysics. – 2022. – T. 63. – №. 1. – P. 98-108.
114. Ramachandran K., Tapp B., Rigsby T., Lewallen E. Imaging of fault and fracture controls in the Arbuckle-Simpson aquifer, Southern Oklahoma, USA, through electrical resistivity sounding and tomography methods // International Journal of Geophysics. – 2012. – P. 132-142.

115. Redhaounia B., Ountsche Ilondo B., Gabtni H., Sami K., Bedir M. Electrical Resistivity Tomography (ERT) Applied to Karst Carbonate Aquifers: Case Study from Amdoun, Northwestern Tunisia // *Pure and Applied Geophysics*. – 2016. – № 173. – P. 1289-1303.
116. Rizzo E., Colella A., Lapenna V., Piscitelli S. High resolution images of the fault controlled High Agri Valley basin (Southern Italy) with deep and shallow electrical-resistivity tomographies // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2004. – №29. – P. 321-327.
117. Sabrina Y. Fazzito, Augusto E. Rapalini, Jose M. Cortes, Carla M. Terrizzano Characterization of Quaternary faults by electric resistivity tomography in the Andean Precordillera of Western Argentina // *Journal of South American earth sciences*. – 2009. – № 28. – P. 217-228.
118. Schutze C., Vienken T., Werban U., Dietrich P., Finizola A., Leven C. Joint application of geophysical methods and Direct Push-soil surveys for the improved delineation of buried fault zones // *Journal of applied geophysics*. – 2012. – Vol. 82. – P. 129-136.
119. Shlykov A., Saraev A., Agrahari S. Studying vertical anisotropy of a horizontally layered section using the controlled source radiomagnetotellurics: an example from the North-Western region of Russia // *Geophysica*. – 2019. – 54(2). – P. 3–21.
120. Smith D. K., Tolstoy M., Fox C. G., Bohnenstiehl D. R., Matsumoto H., Fowler M. J. Hydroacoustic monitoring of seismicity at the slow-spreading Mid-Atlantic ridge // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Vol. 39. – №11. – P. 13-1-13-4.
121. Turova I., Deev E., Pozdnyakova N., Entin A., Nevedrova N., Shaparenko I., Bricheva S., Korzhenkov A., Kurbanov R., Panin A. Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai fault zone (Gorny Altai, Russia): trenching and geophysical evidence // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2020. – T. 197. – P. 104399.

122. Valois R., Camerlynk C., Dhemaied A., Guerin R., Hovhannissian G., Plagnes V., Rejiba F., Robain H. Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France) // Earth surface processes and landforms. – 2011. – № 36. – P. 1183-1192.
123. Xiao M., Shwiyhat N. Experimental Investigation of the Effects of Suffusion on Physical and Geomechanic Characteristics of Sandy Soils // Geotechnical Testing Journal. – 2012. – Vol. 35. – №. 6.
124. Zhu T., Zhou J., Wang H. Localization and characterization of the Zhangdian-Renhe fault zone in Zabo city, Shandong province, China, using electrical resistivity tomography (ERT) // Journal of Applied Geophysics. – 2017. – № 136. – P.343–352.
125. Zond-geo [Electronic resource] - <http://zond-geo.com/>
126. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M= 7.8, 1976) in China //Pure and applied geophysics. – 1984. – T. 122. – №. 6. – C. 901-920.