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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2026

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

Научный руководитель:
Неведрова Нина Николаевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск).

Официальные оппоненты:
Буслов Михаил Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геодинамики и магматизма ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск);
Буддо Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Ведущая организация:
Акционерное общество «Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики» (АО «НВНИИГГ»), г. Саратов.

Защита состоится 25 декабря 2026 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН;
e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:
http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/shaparenko2026/dis-Shaparenko.pdf

Автореферат разослан 13 ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.г.-м.н. Е.А. Мельник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 суфффозионных 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 ее развитыми аппаратурными 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 Результаты работы докладывались и обсуждались на научных российских и международных конференциях в Новосибирске (2016, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023), Москве (2018, 2019), Санкт-Петербурге (2016), Бишкеке (2017, 2021), Иркутске (2018, 2024), Сочи (2022).

Публикации Результаты исследования известны научной общественности. Они изложены в 22 научных публикациях, в том числе пяти статьях в научных рецензируемых журналах, рекомендованных Перечнем ВАК («Литосфера», «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири», «Journal of Asian Earth Sciences», «Известия Томского политехнического университета. «Инжиниринг георесурсов», «Geodynamics and Tectonophysics, Геодинамика и тектонофизика») (все статьи входят в категорию К1).

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

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения объёмом 113 страниц, содержит 55 рисунков. Список цитируемой литературы включает 126 наименований.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она представлена к защите

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.6.9 «Геофизика» по геолого-минералогическим наукам, п. 16 (Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей) и п. 18 (Использование геолого-геофизических данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений).

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. Суродиной, 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава является обзорно-аналитической частью работы, в которой рассмотрены физические основы используемого метода, предшествующий опыт применения геофизических методов для исследования разломных зон и карстово-суффозионных процессов.

Метод электротомографии, имеющий ряд преимуществ по сравнению с уже существующими методами сопротивлений, начал развиваться с 80-гг. прошлого столетия, вначале за рубежом и затем в России. Важным преимуществом 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 питающим и измерительным. Использование ЭТ существенно ускоряет процесс полевых работ по сравнению с ВЭЗ [Loke et al., 2013], а значительная плотность измерений обусловливает его высокое пространственное разрешение.

В настоящее время ЭТ активно развивается и применяется для решения широкого спектра задач по изучению земных недр до глубин несколько сотен метров.

В мировой практике и в России ЭТ для изучения параметров разломных структур активно применяется. Авторы работы [Семинский, Зарипов, Оленченко, 2016] учитывают представления тектонофизики о стадийности разломообразования, предопределяющей закономерное существование в породном массиве разных уровней нарушенности горных пород.

К настоящему времени накоплен значительный опыт применения методов постоянного и переменного тока для исследования разломных зон Горного Алтая [Деев и др., 2012; Неведрова и др., 2017]. В работе [Неведрова, Деев, Пономарев 2017] по данным ВЭЗ и ЗСБ получены глубины до кровли фундамента, построены геоэлектрические разрезы осадочного чехла Чуйской Курайской, Уймонской впадин и выделены предполагаемые разломы. Авторы рассматривают строение осадочного заполнения и фундамента крупных межгорных впадин как разломно-блоковое [Неведрова и др., 2016; Санчаа, Неведрова, Пономарев, 2019].

В последние 10 – 15 лет для поиска и определения зон провалов, связанных с карстами, зачастую привлекают электротомографию [Bermejo et al., 2016; R. Valois et al., 2011]. В каждой из этих публикаций авторы методом электротомографии исследуют пустые полости разного происхождения и показывают, что карстовые зоны выделяются повышенными значениями УЭС.

Во второй главе представлены результаты обработки и интерпретации полевых данных метода ЭТ, полученных на территории Горного Алтая, с привлечением численного решения прямых и обратных задач.

Сложная система активных кайнозойских разломов определяет современное строение Горного Алтая. Протяженные хребты и высокогорные плато чередуются с межгорными впадинами, в основном приуроченными к речной сети региона. Разломные нарушения в целом формируют блоковое деление земной коры всей этой территории. Крупные кайнозойские разломы, ограничивающие впадины, которые отличаются значительными амплитудами смещения и хорошо проявляются в рельефе, исследуются геоморфологическими методами. Внутриблоковые разломные зоны и разломы в области перехода от горного обрамления к осадочному заполнению в исследуемых впадинах (Чуйской, Курайской, Уймонской) часто перекрыты современными отложениями, поэтому определить их положение и строение методами геокартирования затруднительно. Современные активные разломы по геологическим данным схематично показаны на рис. 1.

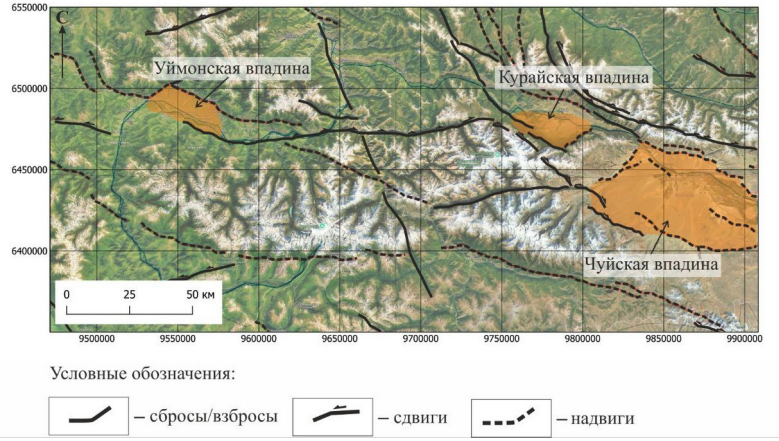


Рисунок 1 – Размещение крупных впадин и современные активные разломы Горного Алтая по геологическим данным [http://neotec.ginras.ru/index/datamap/AFEAD_M45_Map.html].

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 в зависимости от направления смещений могут быть ограничены как вертикальными, так и наклонными границами.

Для получения более полных сведений о глубинном строении разломных структур, особенно перекрытых осадками, применяют геофизические методы, главным образом сейсмические, электрические и и электромагнитные.

Начало работ методами постоянного и переменного тока в Горном Алтае было инициировано разрушительным Чуйским землетрясением 2003 г. (магнитуда 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, где и были начаты полевые работы комплексом методов электроразведки. Вначале привлекались глубинные модификации – ЗСБ и ВЭЗ. Уточнялось строение участков в Чуйской впадине (долина р. Чаган, окрестности пос. Мухор-Тархата) и практически параллельно проводился мониторинг геоэлектрических параметров горных пород.

Измерения ЭТ выполняются с 2012 года, вначале в Чуйской, а затем в Курайской и Уймонской впадинах. Кроме работ по изучению строения отдельных участков, выполнялись инициативные регулярные ежегодные наблюдения (мониторинг) методом ЭТ по профилям в зоне разломов на участках в Чуйской и Уймонской впадинах.

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.

По геологическим данным **долина р. Чаган** – ящикообразный грабен с максимальной мощностью осадков до 300 – 400 м. В пределах этого грабена по данным ВЭЗ и ЗСБ были выделены разломные нарушения [Пономарев и Неведрова, 2015]. С северо-запада его ограничивает разлом, вдоль которого находится известный опорный разрез

Чаган, а юго-восточные ограничения в рельефе не выделяются. До измерений методом ЭТ они только предполагались. 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 р. Чаган были проведены измерения ЭТ по ряду профилей (рис. 2).

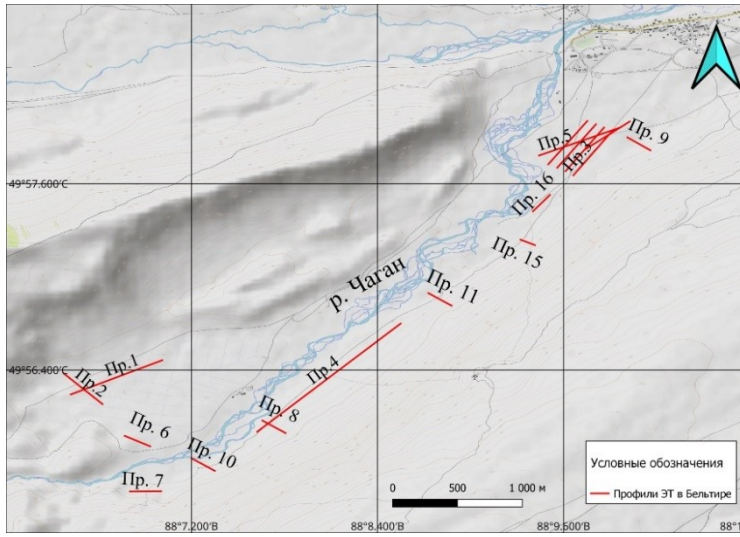


Рисунок 2 – Схема измерений ЭТ в долине р. Чаган (западная часть Чуйской впадины)

Первые результаты, полученные в долине р. Чаган, показали, что на этой территории по данным ЭТ разломные структуры хорошо выделяются.

Для примера рассмотрим разрезы по профилям ЭТ, выполненным вкрест разлома на юго-восточном борту речной долины (рис. 3).

При измерениях ЭТ использовалась установка Шлюмберже, длина профилей составляла 235 м. Инверсия производилась с помощью программы Res2DInv.

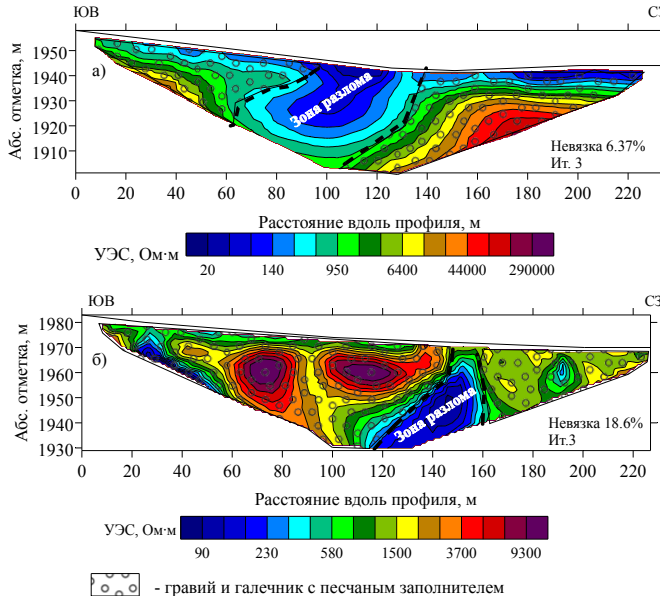


Рисунок 3 – Геоэлектрические разрезы по данным ЭТ по профилям 9 (а) и 10 (б)

Пунктирными линиями ограничена предполагаемая зона разлома.

На обоих разрезах разломная зона выделяется областью пониженных значений УЭС относительно вмещающих более высокоомных пород. Таким образом, результаты инверсии данных ЭТ позволяют обосновать предположение, что правый борт долины р. Чаган ограничен разломом.

Поселок Мухор-Тархата находится практически в центре Чуйской впадины, примерно в 30 км от эпицентра Чуйского землетрясения 2003 г. В поселке и его окрестностях наблюдаются последствия этого разрушительного события. На дневной поверхности видны многочисленные деформации, пострадали жилые и хозяйственные объекты.

Разлом на этом участке обоснован геологическими данными. На основе анализа цифровой модели рельефа по данным радарной съемки (SRTM) и космоснимков LANDSAT д.г.-м.н. Зольников И.Д. разделил территорию Чуйской впадины на несколько крупных геоморфологических сегментов. Граница между сегментами 4 и 5 проходит с севера на юг через участок Мухор-Тархата по р. Мухор, что свидетельствует о наличии межблокового разлома [Зольников, 2010]. Также эта разломная зона выделялась по данным ЗСБ [Шалагинов, Неведрова, 2016].

Девять профилей ЭТ расположены в долине р. Мухор вкрест её течению с запада на восток. Измерения на профилях выполнены за несколько полевых сезонов. На рис. 4 показаны разрезы по пяти южным профилям участка Мухор-Тархата.

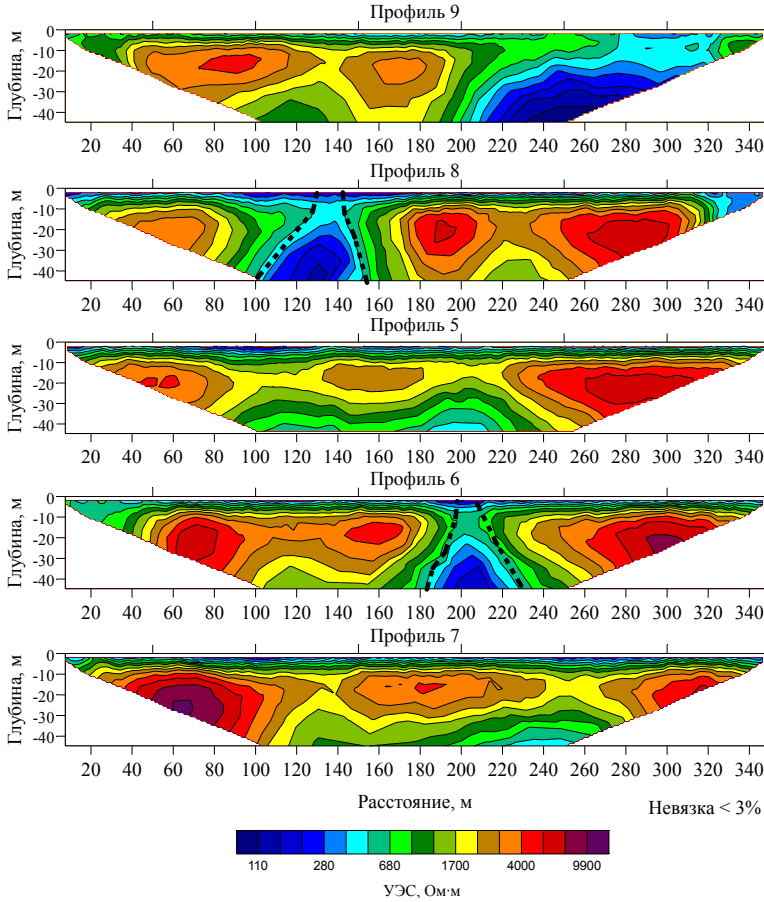


Рисунок 4 – Геоэлектрические разрезы по данным ЭТ в южной части участка Мухор-Тархата (программа DiInSo)

Результат инверсии позволяет определить геоэлектрические характеристики разломной структуры. В южной части участка Мухор-Тархата разломная зона по-разному проявляется на разрезах. Особенно хорошо разлом виден на разрезе по профилю 8. На геоэлектрическом разрезе по профилю 5 зона с разломом перекрыта высокоомными отложениями и хорошо видна только на глубинах более 20 м, а на разрезе

по профилю 6 в верхней части до глубины 20 м она сужается. В восточной части разреза по профилю 9 зона низких УЭС приурочена к руслу реки.

Курайская зона разломов ограничивает с севера Чуйскую впадину и является одной из самых потенциально сейсмоопасных структур Горного Алтая. Одним из объектов исследования был участок измерений ЭТ, расположенный в пределах разломного уступа Курайского хребта который ограничивает Чуйскую впадину на её северо-западе участке. Профиль ЭТ выполнен в области выхода разлома на дневную поверхность. Здесь же была проложена траншея «Чуйская 2» до глубины 2 м на расстоянии по профилю около 120 м. С использованием программы Res2DInv выполнена инверсия данных ЭТ и построен геоэлектрический разрез (рис. 5).

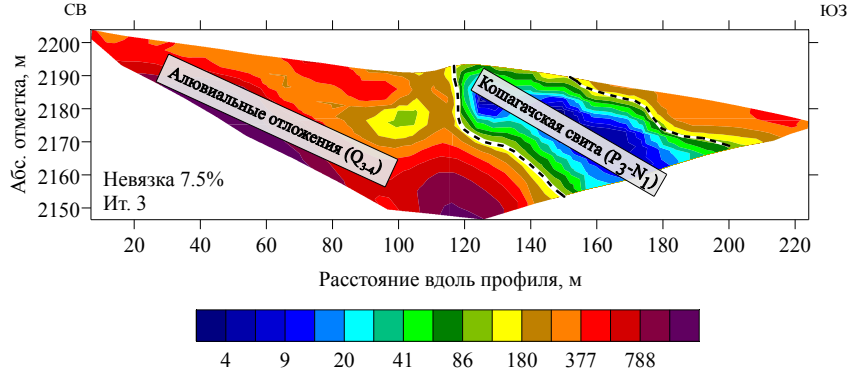


Рисунок 5 – Геоэлектрический разрез с наклонной разломной зоной по данным ЭТ в зоне Курайского разлома (программа Res2DInv)

По результатам изучения траншеи определены литологические характеристики разломной зоны с обратным наклоном, представленные глинистыми отложениями, которые прослеживается до глубины около 40 м по данным ЭТ. В юго-западной части геоэлектрического разреза видно, что разломная зона, за счет присутствия глин кошагачской свиты, хорошо выделяется наклонной областью с существенно пониженными значениями УЭС относительно вмещающих аллювиальных четвертичных отложений.

Численное моделирование используется как при планировании сети профилей для достижения необходимой детальности и глубинности, так и при интерпретации данных для выбора оптимального программного комплекса с целью повышения достоверности результатов. Были использованы различные программные пакеты для решения прямой и обратной задач.

Сопоставлялись результаты инверсии синтетических данных с использованием нескольких программ для 2-х геоэлектрических моделей как с вертикальной границей (рис. 6а), так и с наклонной (рис. 6 б).

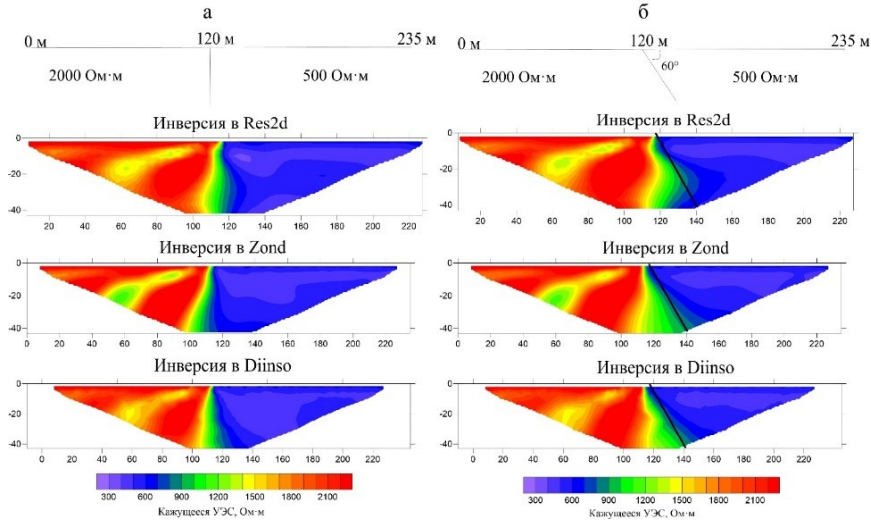


Рисунок 6 – Модели и результаты инверсии синтетических данных (программы Res2DInv, ZondRes2D, DiInSo)

а – для модели с вертикальной границей, б – с наклоном границы 60° (отсчет от горизонтали).

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.

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 Ом·м. Эта зона разделяет два высокоомных блока УЭС 1500 и 500 Ом·м. На рис. 7 показаны выбранные модели, их геоэлектрические параметры – УЭС и размеры блоков по горизонтали, а также результаты модельных расчетов [Шапаренко и др., 2023].

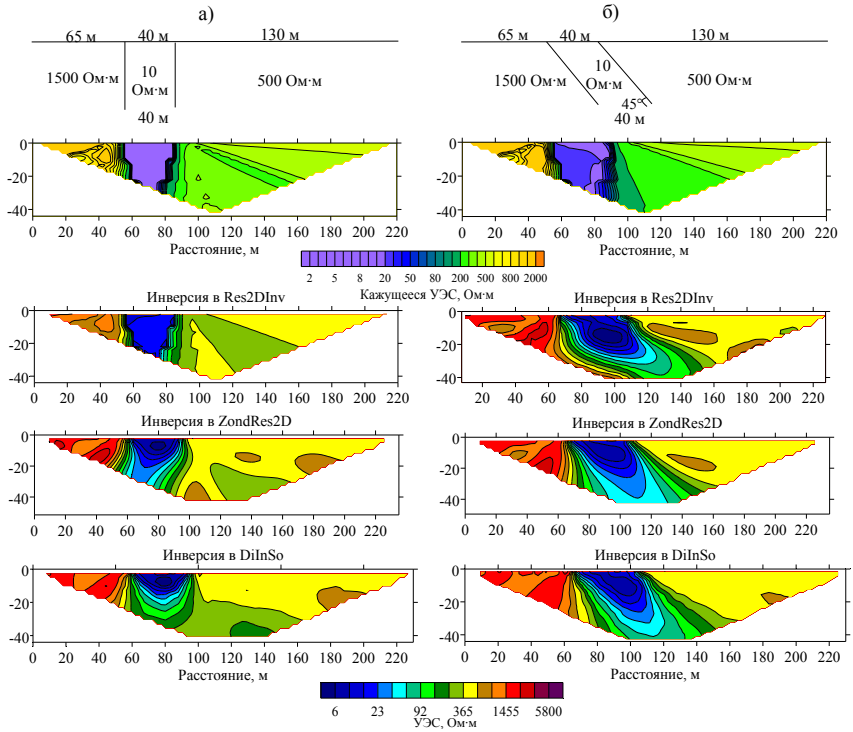


Рисунок 7 – Модели разломной зоны с УЭС 10 Ом·м, результаты решения прямой задачи (программа SCALA-48(GPU)) и инверсии с использованием трёх программ Res2DInv, ZondRes2D и DiInSo

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 (рис. 7а). Для наклонной разломной зоны результаты моделирования показывают, что можно только качественно оценить её положение и угол падения.

Анализ накопленного объёма полевых измерений ЭТ на территории Горного Алтая позволил построить типичные геоэлектрические модели, имитирующие разломные структуры с учётом характерной ширины зоны и распределения УЭС. Основываясь на решении прямой и обратной задач для синтетических данных с применением разных программных комплексов можно выбрать оптимальную программу для интерпретации, и

тем самым повысить достоверность результатов. Это особенно актуально при недостатке априорной информации.

В третьей главе представлены результаты проведенных исследований методами постоянного и переменного тока над нефтегазоконденсатной залежью (Прикаспийская впадина) на участке развития суффозионных воронок.

Детальные измерения ЭТ проведены по 48 субмеридиональным профилям длиной 355 м и с расстоянием 10 м между ними, а также по 11 субширотным профилям длиной 475 м (рис. 8). Применялась аппаратура «Скала 48» с установкой Шлюмберже (шаг между электродами – 5 м).

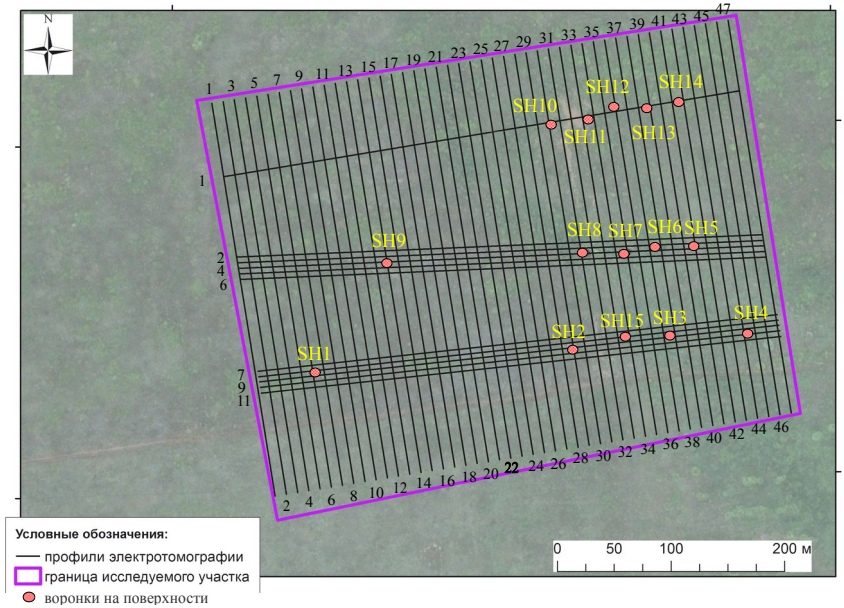


Рисунок 8 – Схема размещения профилей ЭТ и суффозионных воронок

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. Относительная погрешность подбора составила в среднем не более 12 %.

С помощью программы ZondRes3D выполнена инверсия всего объёма данных по широтным и меридиональным профилям. В целом получены низкие значения УЭС, обусловленные литологическим составом засоленных отложений, представленных в основном глинами, суглинками,

песками. С использованием программы визуализации Voxler была построена трёхмерная геоэлектрическая модель до глубины 40 м. Для иллюстрации выбрана изоповерхность на уровне 25 Ом·м (показана зелёным цветом на рис. 9), на которой выделяются вытянутые с запада на восток (полосчатые) чередующиеся зоны высокого и низкого УЭС, к которым приурочены воронки (рис. 9). Воронки показаны с цветовой гаммой, отражающей их объёмы.

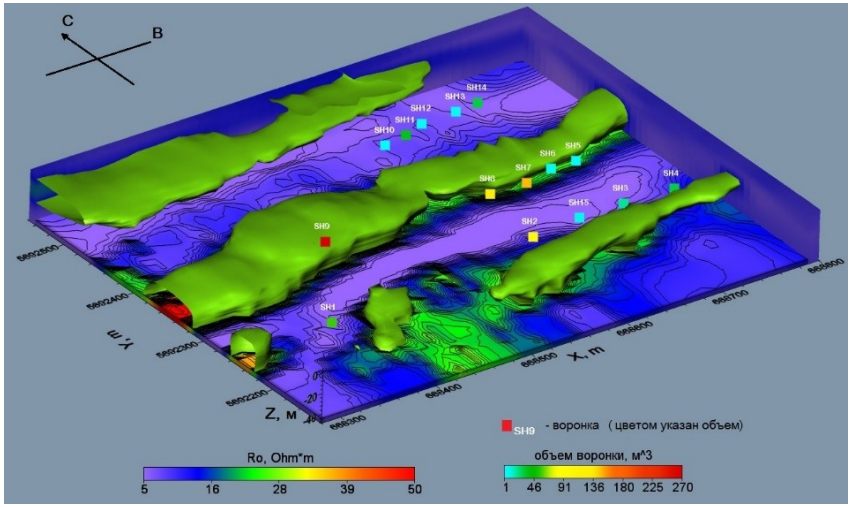


Рисунок 9 – Геоэлектрическая 3D модель по данным ЭТ

Зелёным цветом показаны высокоомные протяженные зоны (изоповерхности 25 Ом·м) [Шалагинов и др., 2019].

Всего на участке находится 15 воронок. Одной из особенностей размещения воронок является приуроченность значительного их числа (10 из 15) к контакту протяженных проводящих и более высокоомных зон, начиная с глубин 15 – 20 м. Пять самых северных воронок расположены в пределах низкоомной зоны. Эта особенность подтверждается и на более глубоких горизонтальных срезах трёхмерной модели.

Из анализа площадного распределения УЭС можно сформулировать основные закономерности размещения воронок на участке исследования. Воронки, расположенные в юго-восточной части участка, находятся на границах низкоомных и более высокоомных зон. Скорее всего, эти протяженные высокоомные зоны являются ограничивающим фактором в развитии суффозионных процессов. Вдоль них водными потоками и происходило вымывание глиняного и солевого «цемента», что привело к депрессии приповерхностного горизонта до

глубин от 15 до 30 м с последующей просадкой подповерхностных отложений.

На участке исследования также выполнены зондирования методами ВЭЗ и ЗСБ. Результаты инверсии этих данных были сопоставлены с геоэлектрической моделью по данным ЭТ.

Пространственное изображение геоэлектрического строения основных структур по данным комплекса методов, связанных с процессом развития суффозионно-просадочных процессов на исследуемом участке, представлена на рис. 10. Красным пунктиром указано направление стока вод вдоль кровли отложений триасового возраста, а черными стрелками – траектория сброса вод в отложения мелового и юрского возраста [Отчет «Исследование природы…», 2014].

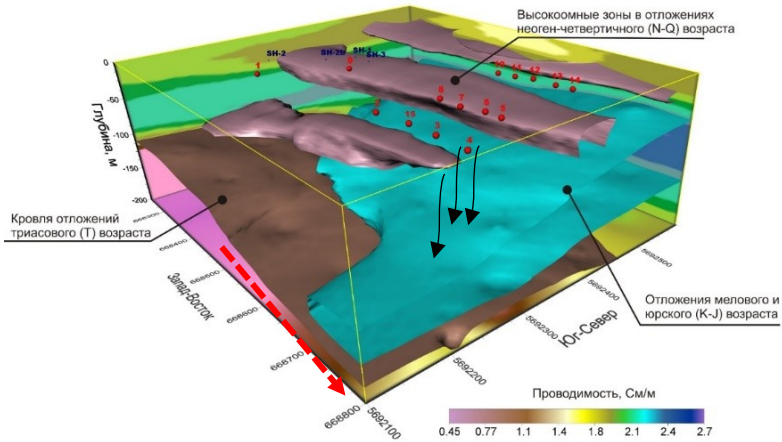


Рисунок 10 – Пространственная визуализация геоэлектрического строения участка по данным ЭТ, ВЭЗ и ЗСБ

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

Для первой группы воронок (SH2-SH8, SH10-SH15) в зоне понижений рельефа, соответствующих руслу сброса вод из водохранилища, основной механизм образования связан с разгрузкой сбросовых вод в подстилающие низкоомные меловые (К) и юрские (J) отложения. Вклад инфильтрации атмосферных осадков и талых вод менее значимы.

Одной из причин возникновения суффозионных процессов является искусственное нарушение режима подземного потока. На участке нарушение гидрогеологического режима связано с постройкой гидротехнических и других сооружений.

В 1950 – 1960 гг. в одной из балок было создано водохранилище, расположенное южнее зоны проявления суффозионных процессов. В приплотинной области его левого борта построено водоотводное сооружение. Оно предназначено для сброса излишков воды из водохранилища по сухому логу в понижение рельефа, к которому и приурочены суффозионные провалы. Вновь возникший поверхностный водоток вместе с разливами сбросовых вод в его устье, вероятнее всего, стал фактором интенсивного увлажнения существующих суглинистых просадочных грунтов. Продолжительное воздействие водных потоков вызвало активизацию суффозионно-просадочных процессов на исследуемом участке [Отчет «Исследование природы…», 2014].

Почти линейное расположение этой группы воронок коррелирует с выявленными высокоомными протяженными зонами в подповерхностной части разреза. Они совпадают по азимуту с направлением распределения воронок. По геологическим данным участок расположен на границе III-ей надпойменной террасы р. Илек и делювиального склона в тыловой закраине. Можно предполагать, что 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 глинистый и солевой цементирующий материал, а выявленные более высокоомные зоны в этих отложениях трассировали направление вымывания. Затем происходила разгрузка сбросовых вод в подстилающие низкоомные меловые и юрские отложения, и далее по склону они уходили на глубину. Поэтому образование суффозионных воронок (SH2-SH8, SH10-SH15) происходило быстрее всего и в настоящее время они остаются практически без изменений. Инфильтрация атмосферных осадков и талых вод не приводит к росту воронок, поскольку деструктивные процессы без дополнительного притока пресных вод остановились. При этом в подстилающих отложениях и связанных с ними воронками сохраняется устойчивая гидрологическая ситуация.

Несколько другой механизм образования воронок SH1 и SH9. Они находятся вне основного русла сброса вод из водохранилища. Поэтому для них можно предположить, что основной вклад в вымывание цементирующих компонентов грунта в верхней части разреза происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и талых вод в подстилающие низкоомные меловые и юрские отложения. Можно считать, что воронки

SH1 и SH9 должны были формироваться более длительное время. По результатам анализа геоэлектрического разреза с двумя этими воронками, с достаточной долей уверенности можно считать, что процесс их формирования еще не завершены. Визуальный осмотр воронок подтверждает этот вывод. У воронки SH9 наблюдаются крутые обрывистые края и лишь частично сформировавшийся поверхностный покров. Для воронки SH1 таких внешних факторов не отмечено, что, возможно, объясняется более медленной скоростью деструкции.

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, простирание 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК:

1. 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.

2. **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. – № 2. – С. 41-50. – 2023.

3. 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. – V. 197. – P.104399.

4. 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. – 330. – № 4. – С.26-40.

5. 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.

Основные материалы и тезисы конференций:

1. **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 (г. Иркутск, 16-21 сентября 2024 г.). – С. 133-134.

2. **Шапаренко И. О.**, Неведрова Н. Н. Возможности мониторинга на участках с разломными структурами Горного Алтая методом электротомографии. Геоэкология: Интерэкспо ГЕО-Сибирь-XX. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – 2024. – Т. 2. - №4. – с. 204-210.

3. **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.

4. **Шапаренко И.О**., Неведрова Н.Н. Применение метода электротомографии для исследования разломных структур (на примере Горного Алтая) //Геосочи-2022. Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики: Материалы международной научно-практической конференции (г. Сочи, 27-29 апреля 2022 г.) – Сочи – С. 14-17 – 2022.

5. 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: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 137-144.

6. Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., **Шапаренко И.О.** Геоэлектрические модели разломных зон Горного Алтая // Триггерные эффекты в геосистемах: Тезисы докладов V-й Международной конференции (г. Москва, 4-7 июня 2019 г.). – 2019. – С. 142-143.

7. **Шапаренко И.О.**, Неведрова Н.Н. Применение метода электротомографии для исследования разломных зон (на примере Горного Алтая) // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 8-14 апреля 2019 г.). – 2019. – С. 184-185 (РИНЦ).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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.
5. 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.
6. Пономарев П. В., Неведрова Н. Н. Геоэлектрическое строение геодинамического полигона «Бельтир» в Чуйской впадине по данным метода сопротивлений //Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – №. 2. – С. 194-199.
7. 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
8. 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.
9. Новиков И. С. Морфотектоника Алтая // Геоморфология. – 2003. – № 3. – С. 10–25.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Подольный О.В. Исследование природы образования и развития суффозионно-карстовых образований на территории Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения / О.В. Подольный, Т.Л. Тесленко, М.М. Бураков, А.Г. Кучин. – Астана, 2014. – 235 с.
14. 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.

Технический редактор Т.С. Курганова
Подписано в печать 20.10.2026
Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс
Печ. л. 1,2. Тираж 90. Зак. № 254
ИНГГ СО РАН, ОИТ 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3