

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

На правах рукописи

Мишенина София Павловна
**Строение приповерхностных путей разгрузки гидротерм
на примере термальных полей Курило-Камчатской островной гряды
по данным геоэлектрики и геохимии**

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ельцов Игорь Николаевич

Новосибирск, 2025 г.

Оглавление

Введение.....	5
Актуальность исследования	5
Цель исследования.....	6
Научные задачи	6
Защищаемые научные результаты	6
Личный вклад	7
Фактический материал	8
Научная новизна	8
Теоретическая и практическая значимость результатов	9
Апробация работы и публикации.....	10
Объем и структура работы.....	11
Благодарности	11
Глава 1. Состояние проблемы.....	12
1.1 Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ).....	12
1.2 Частотное зондирование (ЧЗ).....	13
1.3 Электротомография (ЭТ).....	15
1.4 История изучения вулканов методами геоэлектрики	16
1.5 Исследования вулканов с помощью геофизических методов	19
1.6 Комплексные исследования активных вулканов с применением геофизических и геохимических методов.....	25
1.7 Моделирование подповерхностного пространства по данным электроразведки	32
1.7 Выводы	37
Глава 2. Объекты исследования.....	38
Кальдера Узон	39
Кальдера Академии Наук.....	42
Вулкан Мутновский.....	45
Вулкан Эбеко.....	47
Выводы.....	49
Глава 3. Методы исследования	50
3.1 Методика полевых геофизических работ.....	51

3.1.1	Частотное зондирование	51
3.1.2	Электротомография.....	53
3.2	Методика полевых геохимических работ и характеристики приборов.....	56
3.3	Аналитические лабораторные методы	61
3.4	Обнаружение количественных связей.....	61
3.5	Полевые исследования в кальдере вулкана Узон.....	63
3.6	Полевые исследования в кальдере Академии Наук.....	64
3.7	Полевые исследования на Мутновском вулкане.....	67
3.8	Полевые исследования на вулкане Эбеко	69
3.9	Выводы	70
Глава 4. Анализ результатов исследований.....		71
4.1	Кальдера Узон	71
4.1.1	Геохимические параметры термальных и поровых растворов.....	71
4.1.2	Результаты геофизических исследований.....	72
4.1.3	Связь геофизических и геохимических параметров среды.....	75
4.1.4	Выводы	77
4.2	Кальдера Академии Наук.....	78
4.2.1	Геохимические параметры термальных и поровых растворов.....	78
4.2.2	Результаты геофизических исследований.....	80
4.2.3	Связь геофизических и геохимических параметров среды.....	86
4.2.4	Выводы	90
4.3	Вулкан Мутновский	91
4.3.1	Геохимические параметры термальных и поровых растворов.....	91
4.3.2	Результаты геофизических исследований.....	93
4.3.3	Связь геофизических и геохимических параметров среды.....	96
4.3.4	Выводы	99
4.4	Вулкан Эбеко	100
4.4.1	Геохимические параметры термальных и поровых растворов.....	100
4.4.2	Результаты геофизических исследований.....	101
4.4.3	Связь геофизических и геохимических параметров среды.....	101
4.4.4	Выводы	102
Заключение		104

Список сокращений	107
Словарь терминов.....	109
Список литературы	111

Введение

Актуальность исследования

Актуальность данной работы обусловлена растущей необходимостью получения более полной информации о приповерхностном строении современных активных вулканах в связи с их активизацией. Недостаточно изучены геохимические и петрофизические параметры, напрямую влияющие на геоэлектрическую структуру геотермальных систем, их развитие и поведение.

В мировой науке и практике остро ставится вопрос о возобновляемых источниках энергии, в частности – геотермальной. Несмотря на значительное количество активных вулканов в России данная тема не столь популярна и недостаточно изучена [Кугаенко, Мельников, 2005; Spichak, 2010; Вилор и др., 2018; Каймонова и др., 2018], как за рубежом [Hermans, 2012; Munoz, 2014; Nieto et al., 2019]. До недавних пор об исследовании источников геотермальной энергии с помощью электротомографии вышло немного публикаций, но в последние годы тема изучения термальных полей методами электроразведки интересует учёных по всему миру [Santilano et al., 2015; Ненюкова, Спичак, 2023; Sáez Blázquez et al., 2024]. Однако, остаются неисследованными многие термальные поля Камчатки.

Основную роль в изучении активных гидротермальных систем играют экспедиционные исследования. Однако, недоступность объектов, суровые условия работы, необходимость нести оборудование на себе существенно ограничивают количество видов исследования. Между тем, во многих странах, в том числе в России долгие годы функционируют геотермальные электростанции – источники возобновляемой энергии, и их количество растёт. Однако для поддержания эффективности и расширения такого рода электростанций необходимы более детальные данные по строению и активности гидротермальных систем. Таким образом, **актуальность** работы заключается в необходимости получения и актуализации имеющихся данных по термальным полям активных вулканов Камчатки.

Цель исследования

Целью исследования является выявление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки приповерхностных гидротерм на примере термальных полей Курило-Камчатской островной гряды.

Научные задачи

- определить геоэлектрическую зональность подповерхностного пространства термальных полей с помощью методов геоэлектрики: индукционным частотным зондированием (ЧЗ) и электротомографией (ЭТ);
- установить качественную и количественную связь геофизических и геохимических параметров среды;
- проинтерпретировать результаты геофизических и геохимических исследований для определения строения подповерхностного пространства гидротермальных систем.

Работа была выполнена в рамках проектов:

- ИП СО – ДВО РАН (2009 – 2012) Разработка моделей формирования и эволюции флюидо-магматических систем в Курило-Камчатском регионе (рук. В.А. Верниковский, Е.И. Гордеев)
- РФФИ 14-05-00798 Модели формирования и эволюции газогидротерм Курило-Камчатского региона (рук. Е.П. Шевко, ИГМ СО РАН).

А также при поддержке экспедиционных и лабораторных исследований дирекцией ИНГГ СО РАН академиками М.И. Эповым и А.Э. Конторовичем

Защищаемые научные результаты

1. Грязевые котлы на термальных площадках кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов, что установлено с помощью частотного зондирования. Построена геоэлектрическая модель, описывающая зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. Минерализация и уровень концентрации элементов в жидкой фазе зависит от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода».

2. По результатам интерпретации данных электротомографии установлено, что гейзеры Академии Наук (гидротермы системы озера Карымского) питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на полуострове Новогодний уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева.
3. По данным частотного электромагнитного зондирования и электротомографии термальные растворы грязевых котлов на Донном фумарольном поле вулкана Мутновский с уникальным химическим составом имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м. Разнообразие составов термальных разгрузок определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии во всех полевых исследованиях: в качестве лаборанта полевых измерений *in situ*, а также камерального лаборанта (2006-2010 года), оператора электроразведочной станции в течение полевых сезонов 2010–2020 гг., планировании и проведении полевых работ 2018, 2020 года, Выполнена количественная и геологической интерпретации данных,

Автором лично отобраны все пробы для химических анализов вещества, извлечены поровые растворы, выполнены основные замеры (рН, Eh, электропроводность, содержание основных катионов и анионов в растворах). Были обработаны, проинтерпретированы и проанализированы все представленные в диссертационной работе данные (результаты электротомографии и частотного зондирования, результаты геохимических анализов вещества растворов и поровых вод). Подготовлены публикации по теме диссертации.

Фактический материал

Фактический материал, собранный лично автором и при его непосредственном участии, представлен в таблице 1 (количество профилей ЭТ и ЧЗ, объединённых в трёхмерный массив данных, либо же обработанных и рассмотренных по отдельности, количество отобранных и проанализированных проб жидкости и твёрдого вещества со стенок котлов). Также приведено количество анализов проб растворов и поровых вод по методу ИСП-АЭС, выполненных в Аналитическом центре ИГМ СО РАН на приборе IRIS Advantage. Все представленные материалы проанализированы и проинтерпретированы автором.

Таблица 1 - Фактический материал, собранный лично автором и при его непосредственном участии

Исследования: \ Объекты:	Вулкан Мутновский	Кальдера Академии Наук	Кальдера вулкана Узон	Вулкан Эбеко
Профили электротомографии	4	21	2	6
Профили частотного зондирования	16	6	14	10
Пробы жидкости, вещества котлов	486	440	98	28
Анализы ИСП-АЭС	421	386	83	26
Площадки, покрытые сетью исследований для трёхмерной визуализации по данным:				
частотного зондирования	1	-	1	1
электротомографии	2	1	-	-

Научная новизна

Впервые на нескольких гидротермальных полях Камчатки для установления строения каналов разгрузки применён комплекс электрометрических методов (частотное зондирование, электротомография) и геохимическое опробование.

Построены геоэлектрические модели, описывающие конфигурации и структуры каналов гидротерм, определены их количественные характеристики (геометрические параметры, удельное электрическое сопротивление, минерализация и др.).

Для исследованных объектов установлено, что гидротермы различного типа и гидрохимического состава питаются из единого канала, а вариации их состава, вероятно, обусловлены взаимодействием системы «вода-порода», что подтверждается геохимическим опробованием.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированного научно-методического аппарата. А именно:

- приборная база – современные сертифицированные приборы IRIS Syscal PRO Switch 48, Скала-48, Скала-48K12, ЭМС (Nemfis) для электроразведочных исследований; Эксперт-001 для определения pH, Eh, основных катионов и анионов in situ, НАСН Fe²⁺ с соответствующим набором реагентов для определения двухвалентного железа in situ, IRIS Advantage (Аналитическая ошибка - 10-15%) в АЦ ИГМ СО РАН для метода ICP-AES;
- ПО для первичной фильтрации данных электротомографии SibER Tools, Xeris, ProsysII; ПО для решения обратных задач Res2DInv, Res3DInv (отклонение каждой последующей итерации при инверсии минимально, но не более 10%, в работе приведены результаты пятой итерации каждой инверсии).

Также достоверность полученных результатов обеспечивается моделированием, а именно решением прямой задачи в ПО Res2DMod для двумерных и в Res3Dmod для трёхмерных геоэлектрических моделей. Полученные результаты были сопоставлены с рядом других публикаций и с согласованы с теоретическими положениями и опубликованными по теме исследования работами.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Полученные и описанные в данной работе результаты комплексных геофизико-геохимических исследований показали, что каждое из четырёх термальных полей имеет собственную систему общих питающих каналов, в то

время как в многочисленных, в том числе и современных исследованиях идёт речь об индивидуальных питающих каналах каждого из термопроявлений ввиду разности их составов, уровней кислотности, окислительно-восстановительного потенциала и общей минерализации.

Практическая значимость данной работы заключается в эффективности изучения геотермальной деятельности с помощью апробированного комплекса геофизико-геохимических исследований. Результаты исследования данных систем могут использоваться для выбора точек бурения геотермальных скважин. Кроме того, результаты диссертации обосновывают неразрушающие способы контроля подповерхностного пространства, позволяющие обеспечить безопасность маршрутов туристических троп.

Апробация работы и публикации

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались на 12 международных конференциях в России и за рубежом. Опубликовано 6 статей в российских и зарубежных журналах из списка ВАК:

1. Батанов Ф.И., Абкадыров И.Ф., Дегтерев А.В., Захаров С.М., **Коханова С.П.**, Новиков Ю.В., Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Хомчановский А.Л., Хубаева О.Р. Экспедиция "Итуруп 2022-2023": основные направления работ и предварительные результаты // Геосистемы переходных зон – № 1 (8) – С. 47-55 – 2024.
2. Шевко Е.П., Гора М.П., **Коханова С.П.**, Панин Г.Л. Формирование состава термальных вод современных активных вулканов на примере кальдеры Головнина (о. Кунашир, Курильские острова) // Тихоокеанская геология – том 42 – № 1 – С. 100-111 – 2023.
3. **Kokhanova S.**, Kucher D., Volynkin S. Geophysical and geochemical studies on an active volcano (Ebeko volcano, Paramushir Island) // Reliability: Theory and Applications – том 70 – № 4 – С. 357-360 – 2022.
4. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., **Bortnikova S.P.**, Panin G.L., Zelenski M. Trace Elements and Minerals in Fumarolic Sulfur: The Case of Ebeko Volcano, Kuriles // Geofluids – том 2018 – 2018.

5. Панин Г.Л., Гора М.П., **Бортникова С.П.**, Шевко Е.П. Подповерхностная структура Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко (о. Парамушир) по данным геоэлектрических и геохимических исследований (Курильские острова) // Тихоокеанская геология – том 34 – № 4 – С. 67-85 – 2015.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объём работы составляет 127 страниц, включая 51 рисунок и 11 таблиц.

Благодарности

Благодарю моего научного руководителя Игоря Николаевича Ельцова за совместные экспедиционные исследования и стимул к написанию диссертации.

Благодарю коллег, научивших меня многому, с кем мы работали на вулканах в разные годы в составе отрядов: Юрия Александровича и Александра Константиновича Манштейнов, Григория Леонидовича Панина, Артёма Яковлевича Шевко, Юрия Григорьевича Карина, Марину Павловну Гору, Ольгу Руслановну Хубаеву, Елену Георгиевну Лупикину, Георгия Михайловича Гавриленко, семью Котенко, Александра Николаевича и Михаила Александровича Фомина, Дмитрия Юрьевича Кузьмина, Елену Геннадьевну Калачёву, Ольгу Лукиничну Гаськову, Алексея Николаевича Фаге, Дениса Игоревича Фадеева. Благодарю моих учителей Михаила Ивановича Эпова и Вячеслава Николаевича Глинских за профессиональное становление и интерес к науке. Выражаю благодарность Евгению Вячеславовичу Балкову за ценные советы и внимание к моей работе.

Я очень благодарна моей маме профессору Бортниковой Светлане Борисовне – за профессию и любовь к ней, за все мои экспедиции. Благодарю мою семью: папу Павла Борисовича Бортникова, сестру Елизавету Павловну Шевко, дочь Еву, и отдельно - моего мужа Михаила Владимировича Мишенина за поддержку на всех этапах исследований.

Глава 1. Состояние проблемы

Человечество изучает вулканы с момента зарождения цивилизации, стараясь если не предсказать извержение, то хотя бы обезопасить своё существование рядом с ними. За последние несколько веков написано множество работ по вулканологии и самым разнообразным методам изучения вулканов. С начала двадцатого века появились вариации электроразведочных методов для детального изучения верхней части разреза, и подробного описания их строения до глубин порядка 200-300 метров [Балков и др., 2003; Балков и др., 2006; Valkov et al., 2006; Манштейн и др., 2006]. Ниже приведено их детальное рассмотрение.

1.1 Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ)

Вся история ВЭЗ началась с каротажа – первых работ братьев Шлюмберже, посвящённых поискам полезных ископаемых, а конкретно – нефти. Первые работы по ВЭЗ, даже не включенные в современные базы данных, датированы началом двадцатого века. Спустя много лет наземные установки электроразведочных зондирований были введены в практику. Однако официально зарегистрированные в базе данных Scopus публикации, использующие термин «vertical electrical sounding», начинают отсчёт с 1955 года (рис. 1.1).

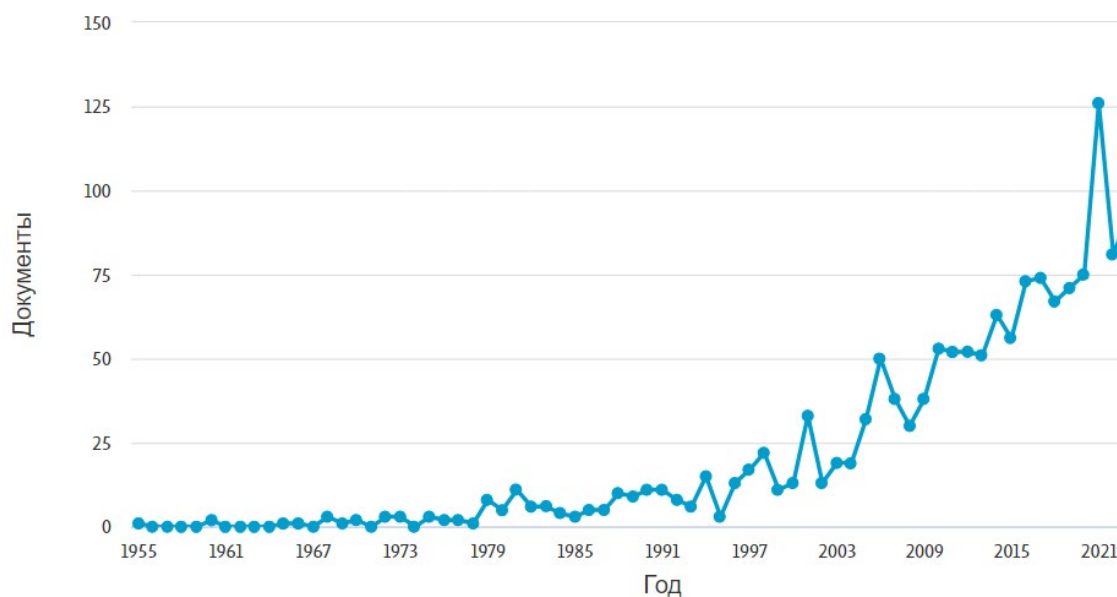


Рисунок 1.1 - Распределение количества публикаций о вертикальном электрическом зондировании по состоянию на первый квартал 2024 года

И несмотря на то, что «отцами» мировой электроразведки стали французы братья Шлюмберже, лидирующее место на данный момент (начало 2024 года) по количеству публикаций занимают Нигерия, Индия и Египет (рис. 1.2).

И если в середине и в конце прошлого века основная часть работ была посвящена разведке и контролю добычи полезных ископаемых, то в 21 веке основными задачами поперхностной электроразведки становятся поиски воды, обнаружение водоносных горизонтов, и решение инженерных задач [Adabanija et al., 2021; Arowoogun, Osinowo, 2022; Christopher et al., 2023; Compaore et al., 2023].

Документы по странам

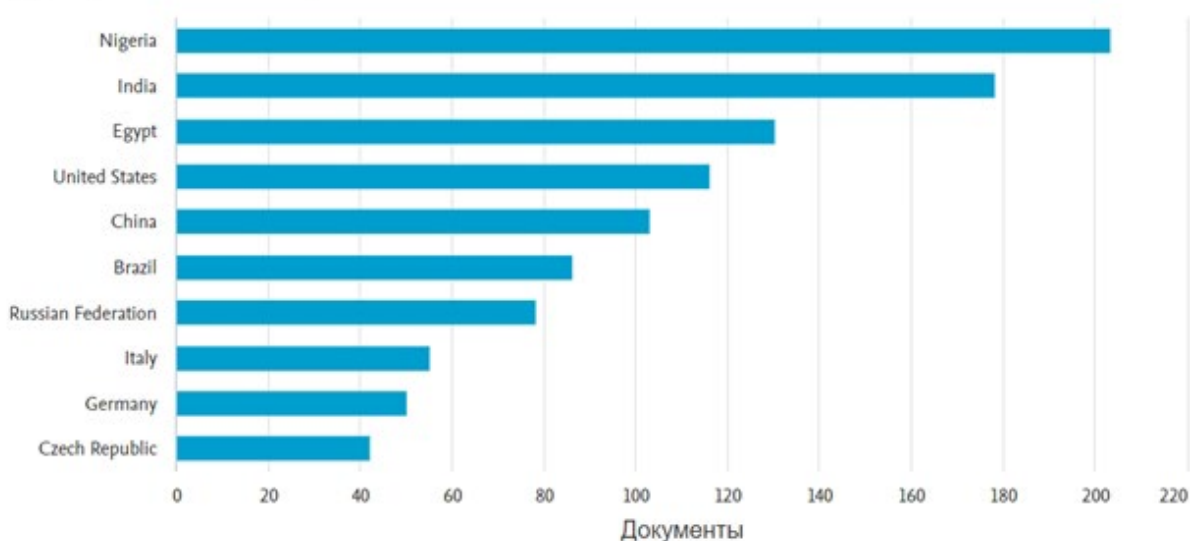


Рисунок 1.2 - Распределение публикаций о вертикальном электрическом зондировании по странам по состоянию на первый квартал 2024 года

1.2 Частотное зондирование (ЧЗ)

Неудивительно, что по частотному зондированию работы в современных системах индексирования начинают свой отсчёт с конца шестидесятих годов прошлого века. Сама по себе идея бесконтактного зондирования жила ещё до нашей эры, когда с помощью «лозы» люди искали воду, находя геомагнитные аномалии. Однако официально зарегистрированные действующие методы появились по историческим меркам совсем недавно (рис. 1.3). Интересно, что количество публикаций постоянно колеблется.

Документы по годам

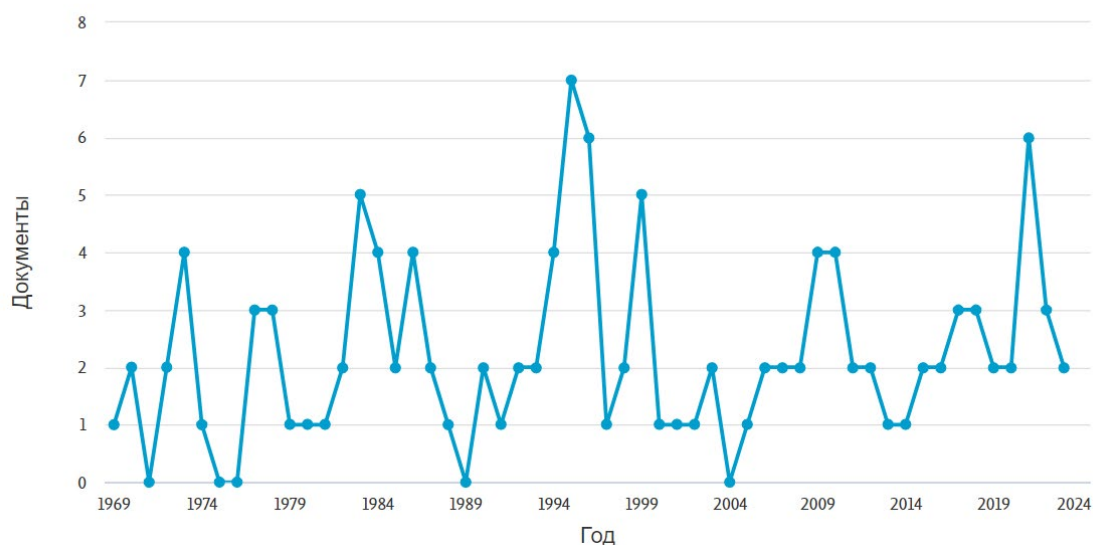


Рисунок 1.3 - Распределение количества публикаций о применении метода частотного зондирования по состоянию на первый квартал 2024 года

При распределении публикаций за весь период по странам на первую позицию по количеству текстов выходит Россия, и с большим отрывом за нами следует США (рис. 1.4). Это говорит об эффективности развития методов частотного зондирования в нашей стране. Более того, если рассмотреть публикации по регионам, выяснится, что большая часть принадлежит именно Сибири, однако, и в европейской части России достаточно публикаций [Балков и др., 2006; Журавлев, Сидорин., 1994; Каевицер. и др., 2008; Шевцов, 2019].

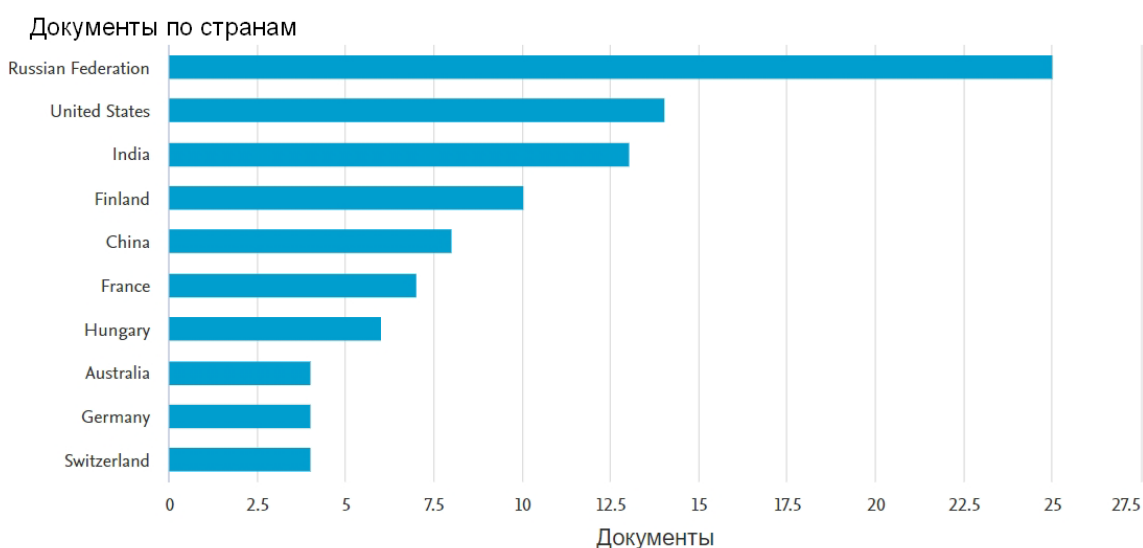


Рисунок 1.4 - Распределение публикаций о применении метода частотного зондирования по странам по состоянию на первый квартал 2024 года

1.3 Электротомография (ЭТ)

Начавшийся в 2000-х годах рост интереса к методу электротомографии не ослабевает до сих пор, ему находят всё новые и новые применения (рис. 1.5). Разные страны вкладывают деньги в развитие ЭТ. Конечно же, большую роль здесь играет возможность применения метода для самых разнообразных инженерных изысканий. Однако, в финансировании исследований Россия не занимает ведущих мест по сравнению, например, с Китаем, Германией, Европой в целом.

Несмотря на это, нам известно множество работ отечественных авторов [Бобачёв и др., 1995; Бобачев, Модин, 2008; Оленченко, Осипова, 2022; Куликов и др., 2017; Неведрова и др., 2016]. При распределении публикаций по выпустившим их странам, лидерство отходит Италии, Китаю, Соединённым Штатам (рис. 1.6).

Документы по годам

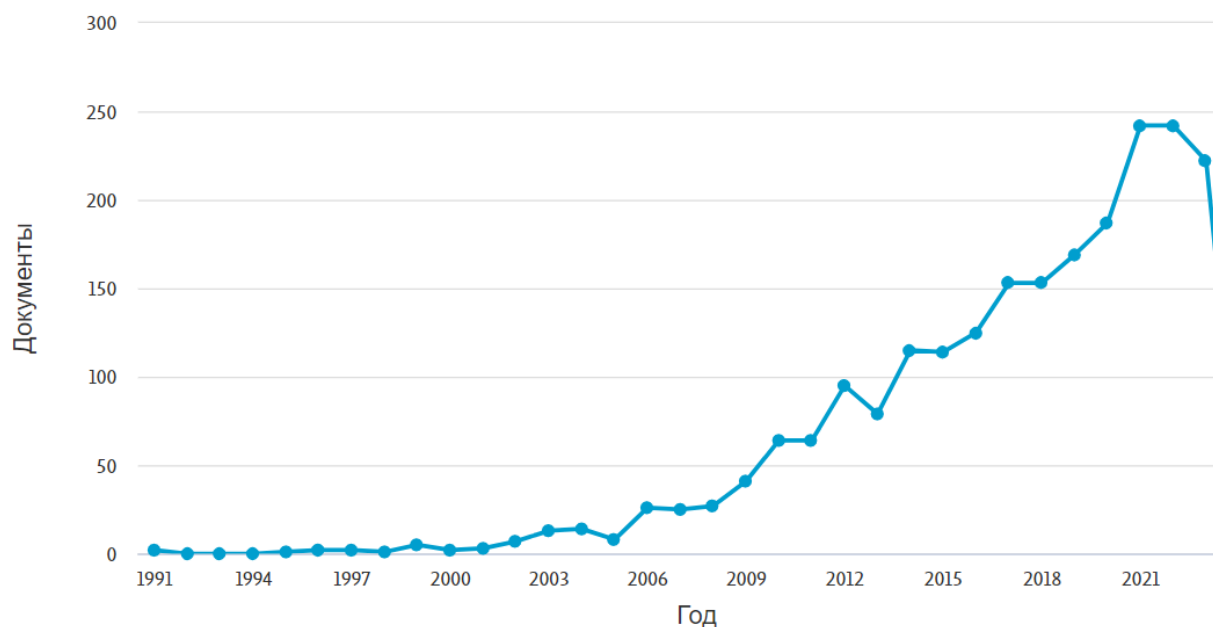


Рисунок 1.5 - Распределение количества публикаций о применении метода электротомографии по состоянию на первый квартал 2024 года

Таким образом, мы подходим к вопросу изучения вулканов уже имея несколько рабочих методов изучения подповерхностного пространства на первые десятки, и даже сотни метров. Рассмотрим кратко историю изучения вулканов.

Документы по странам

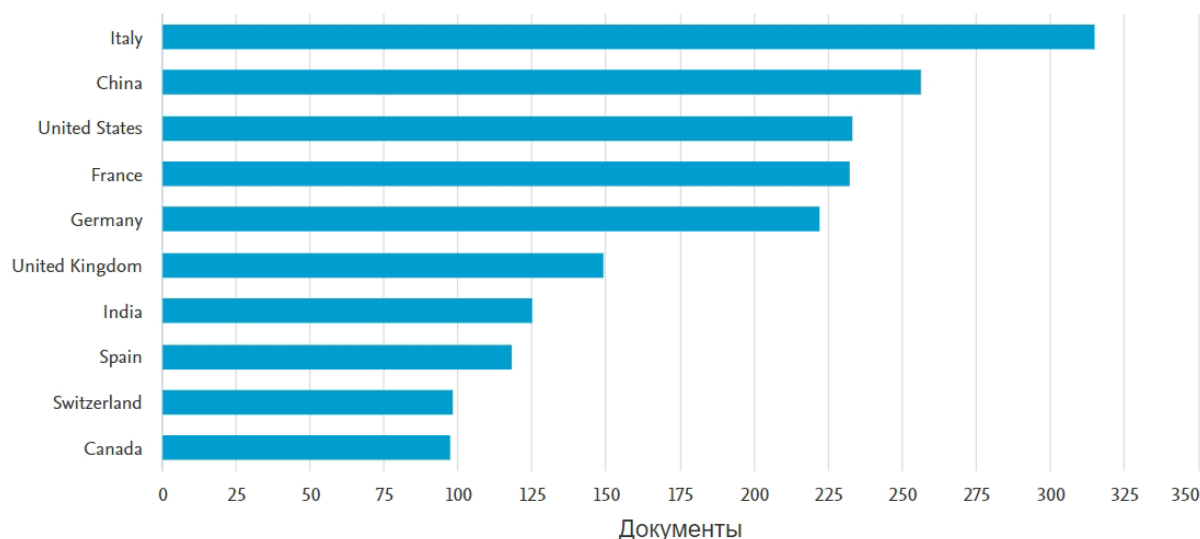


Рисунок 1.6 - Распределение публикаций о применении метода электротомографии по странам по состоянию на первый квартал 2024 года

1.4 История изучения вулканов методами геоэлектрики

С каждым годом количество публикаций по геоэлектрике на активных вулканах растёт. И несмотря на то, что в нашей стране вулканы Курило-Камчатской островной дуги представляют собой величайшую природную ценность и прекрасный объект для электроразведки, Россия уступает в этих исследованиях таким странам, как Греция, Непал, и Португалия (табл. 1.1).

Таблица 1.1 - Долевое участие стран в публикациях по теме «геоэлектрика на активных вулканах» за последние 20 лет

Страна	Кол-во публикаций	%
FRANCE	33	37.079
JAPAN	22	24.719
USA	20	22.472
ITALY	18	20.225
GERMANY	8	8.989
REUNION	8	8.989
SWITZERLAND	7	7.865
AUSTRALIA	3	3.371

Продолжение Таблицы 1.1

Страна	Кол-во публикаций	%
CANADA	3	3.371
NEW ZEALAND	3	3.371
ARGENTINA	2	2.247
INDIA	2	2.247
MEXICO	2	2.247
PEOPLES R CHINA	2	2.247
PHILIPPINES	2	2.247
SENEGAL	2	2.247
SPAIN	2	2.247
SWEDEN	2	2.247
BELGIUM	1	1.124
BRAZIL	1	1.124
BURKINA FASO	1	1.124
CAPE VERDE	1	1.124
EL SALVADOR	1	1.124
ENGLAND	1	1.124
GREECE	1	1.124
ICELAND	1	1.124
INDONESIA	1	1.124
NEPAL	1	1.124
PERU	1	1.124
PORTUGAL	1	1.124
RUSSIA	1	1.124
SCOTLAND	1	1.124
TAIWAN	1	1.124

Причём, стоит отметить, что вышеозначенная российская публикация принадлежит коллективу авторов из ИГМ и ИНГГ СО РАН [Bessonova, et al., 2012].

Исследование структуры активных вулканов и понимание их строения может помочь в добыче геотермальной энергии. На Курило-Камчатской островной дуге есть несколько ГеоТЭС: на вулканах Мутновском (Камчатка), Менделеева (Кунашир), Баранского (Итуруп), которые функционируют уже много лет, обеспечивая теплом и электричеством небольшие посёлки (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 - Геотермальная станция на влк. Мутновском, Камчатка

Более того, эти знания помогают нам в предсказании опасности возможных извержений.

За рубежом ведутся активные исследования в области обнаружения и разработки геотермальных месторождений. Например, с помощью метода сопротивлений выполнено картирование неглубоких структурных разломов и трещин в вулкане Джабой в Индонезии. Территория вокруг вулкана была

запланирована для разработки геотермальной энергии мощностью ~ 50 МВт. На основании исследований сделан вывод о том, что методы применимы для получения информации о приповерхностных структурах в геотермальном поле, а также для локализации пунктов бурения [Yanis et al., 2022].

1.5 Исследования вулканов с помощью геофизических методов

В наше время все исследования проявлений активной вулканической деятельности можно назвать комплексными, так как данные постоянно пополняются, обновляются, идёт поиск междисциплинарных связей и корреляции: магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и сейсмоки, ВЭЗов и геохимической съёмки, данные петрофизических анализов и электротомографии. Тем не менее, исследования нуждаются в определённой систематизации с выделением преобладающего метода исследований.

Например, авторами [Baranwal, Sharma, 2006] были выполнены комплексные геофизические исследования с использованием ВЭЗ, радиационной съёмки, замеров естественного потенциала (ЕТ) и общего магнитного поля для характеристики геотермальной области вокруг горячих источников в районе Nayagarh, Орисса (Индия), находящейся на востоке Индийской геотермальной провинции. Целью исследований было описать характер разрушений в районе геотерм, движения загрязнённых флюидов, а также найти возможный источник отопления почв. С помощью измерений собственного потенциала на горячих источниках была обнаружена аномалия, которая свидетельствует о наличии тела сульфидного состава. Примерно в четырёх километрах от горячих источников был зафиксирован повышенный уровень радиации, что может являться причиной отопления. Однако генезис источника нагрева и его глубина неизвестны. В дальнейшем авторы планировали продолжать работы в данной области с помощью привлечения методов МТЗ.

Со временем данные разного рода геофизических зондирований, геологического и геохимического опробования и аналитики, накапливаясь, позволяют совершенствовать представления о глубинном строении Курило-Камчатской островной дуги. Л.Л. Ваньян и Ю.Ф. Мороз в своих статьях пишут об

исследованиях методами сейсмологии и магнитотеллурического зондирования территории Южной Камчатки, уточняя глубинное строение данного района в целом, а также некоторых групп вулканов в частности пишут: «по данным магнитотеллурических зондирований установлено, что земная кора содержит слой повышенной электропроводности на глубинах 10-14 км. Если говорить о конкретных цифрах, то электрическое сопротивление верхних частей консолидированной коры составляет 1000-2000 Ом•м. При нормальном распределении глубинной электропроводности нижние толщи земной коры имеют удельное сопротивление не менее 500 Ом•м, поэтому природу проводящего слоя в земной коре Южной Камчатки сопротивлением в десятки – единицы Ом•м можно объяснить наличием флюидов. Грубые оценки показывают, что достаточно десятых долей процента флюидов относительно общего объёма в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшение сопротивления горной породы до десятков – единиц Ом•м» [Ваньян, 1991; Мороз, 1991; Мороз, Гонтовая, 2001].

Более того, в публикациях 2001 года Мороз и Гонтовая сообщают: «по данным электропроводности можно оценить пористость и проницаемость пород земной коры Южной Камчатки. Согласно закону Дахнова-Арчи:

$$\rho = \frac{\rho_{\phi}}{k},$$

где ρ – удельное сопротивление влажной породы, ρ_{ϕ} – удельное электрическое сопротивление флюида, k – пористость. При $\rho = 2000$ Ом•м значение $\rho_{\phi} = 0,3$ Ом•м, пористость верхних частей земной коры до глубины 10 км равна 0,8%. Эта величина близка к данным по северо-западу США, полученным Л.Л. Ваньяном. О проницаемости верхних частей консолидированной земной коры можно судить по зависимости удельного сопротивления влажных пород от их проницаемости» [Мороз, Гонтовая, 2001].

Магнитотеллурические зондирования получили широкое распространение и пользуются популярностью среди современных вулканологов. В статье [Whaler, Hautot, 2006] описывается проведение МТЗ по профилю на севере Главного Эфиопского Рифта, где также был развёрнут ряд широкополосных сейсмических

приемников, собраны данные по изменениям гравитации. По сопоставлению результатов исследований авторы приводят достоверный геологический разрез территории.

Также по результатам геоэлектрических и геомагнитных полей области можно сделать выводы о миграции подземных вод, эпицентрах землетрясений, и электромеханическом преобразовании среды, вызывающем геоэлектромагнитные аномалии перед землетрясением [Fan et al., 2010].

Если говорить о регионе объектов исследования, есть фундаментальная работа [Добрецов, Василевский, 2018] по Курило-Камчатской островной дуге и прилегающей части Тихого океана: в этом регионе гравитационные данные оказались весьма информативны вместе с модифицированными данными по рельефу для подводной части, а также для понимания структуры дна Охотского моря (рис. 1.8). В работе предложена процедура модификации рельефа для выявления его тонких особенностей на фоне высокоамплитудных изменений высот. Показана важность использования гравиметрической информации (аномалий в свободном воздухе и Буге) для понимания эволюции тихоокеанского обрамления и проблем вулканизма и геодинамики в зонах субдукции. К сожалению, гравитационные данные мало говорят о структуре глубинных слоев литосферы и астеносфере глубже 100 км. Поэтому трудно говорить по этим данным о структуре магматических очагов, надсубдукционной мантии и погружающейся океанической плиты. Здесь могут помочь сейсмотомографические исследования, но, к сожалению, на Камчатке они недостаточно детальные [Добрецов, Василевский, 2018].

«Освоение и использование геотермальной энергии является одним из приоритетных направлений современной энергетики во многих странах мира» - обоснованно написано в статье «Трёхмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм» [Нурмухамедов и др., 2010]. Там же сообщено: «В России геотермальные ресурсы разведаны на крайне ограниченном числе территорий. Камчатский регион является лидером по их использованию. В 120 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский в основании склона

Мутновского вулкана в труднодоступной пересеченной местности, на водоразделе рек Фальшивая и Жировая находится Мутновское месторождение парогидротерм. На территории месторождения введены в эксплуатацию Верхне-Мутновская и Мутновская геотермальные электростанции (рис. 1.9).

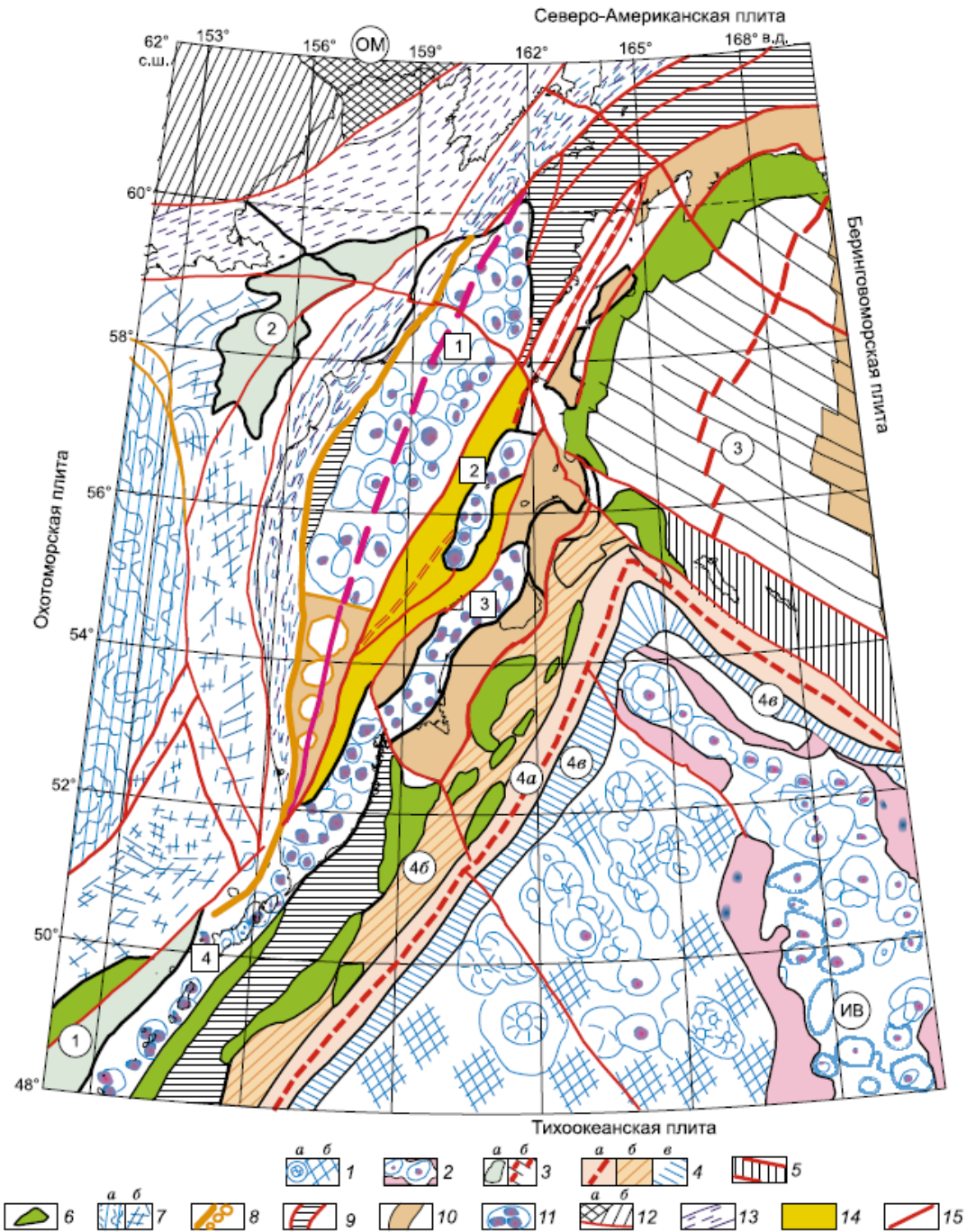


Рисунок 1.8 - Синтетическая карта на основе гравитационных и рельефных данных и геологических данных. 1 — ложе Тихого океана с вулканами (а) и деформационной решеткой между ними (б); 2 — Императорский пояс вулканов (ИВ) гавайского типа, обрамленный шлейфом пепловых осадков; 3 —

глубоководные впадины (цифры 1—3 в кружках): а — Южно-Курильская (1), Шелехова (2), б — Командорская (3); 4 — глубоководные желоба с плоским дном (а), островодужным склоном аккреционного клина (б) и океаническим склоном (в); Командорский блок; 6 — осадочные бассейны на островодужном склоне и линзы в желобе; 7 — ядро Охотоморской плиты океанического типа (а) и обрамление смешанного состава и происхождения (б); 8 — коллизионный шов столкновения с Валагинской дугой и структуры с гранитогнейсовыми куполами, 9 — фрагменты Валагинской дуги; 10 — фрагменты Кроноцкой дуги; 11 — плейстоцен-четвертичные вулканические пояса (цифры 1—4 в прямоугольниках): 1 — Срединного хребта, 2 — Ключевской, 3 — Восточный, 4 — Южной Камчатки и Северных Курил; 12 — Омолонский кратонный террейн (а) и Вилигинский блок (б) с мощной континентальной корой; 13 — складчатые пояса палеоген-мелового возраста; 14 — Центрально-Камчатская депрессия; 15 — главные разломы [Добрецов, Василевский, 2018]

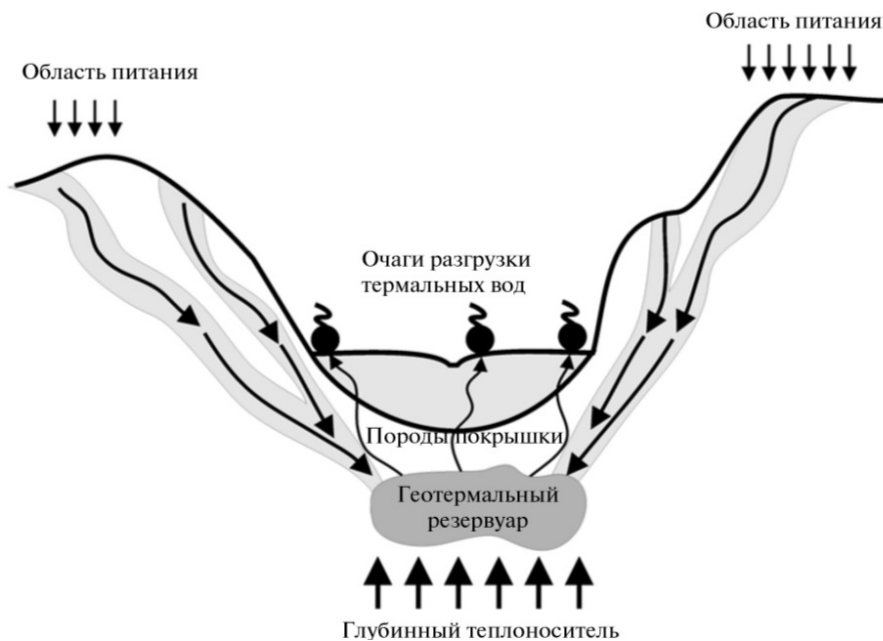


Рисунок 1.9 - Схематическое изображение месторождения парогидротерм согласно статье «Трёхмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм» [Нурмухамедов и др., 2010]

Мутновская ГеоЭС находится в центральной части месторождения. Это — высокоавтоматизированная, наиболее современная и технологичная ГеоЭС в России, мощность которой по данным на 2007 г. составляет 50 МВт. На основании

разработанного Проекта доразведки (геологического доизучения) Мутновского месторождения парогидротерм с целью обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС, в период с 2004 по 2008 гг. был выполнен большой объем электроразведочных работ методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в районе Мутновского месторождения и на его флангах. Основные задачи этих исследований состояли в уточнении геологического строения Мутновского месторождения парогидротерм и выявлении зон распространения гидротерм. В статье приводятся результаты интерпретации данных МТЗ, описывается трехмерная (3D) геоэлектрическая модель, отражающая распределение электропроводности в разрезе Мутновского месторождения парогидротерм до глубины 8 км. Существующие представления о структуре и гидрогеологических процессах, протекающих в зоне активного месторождения парогидротерм, схематично представлены на рисунке 1.9. Согласно этой модели, метеорные воды из области питания проникают на значительную глубину в толщу осадочных или вулканогенно-осадочных пород и скапливаются в пределах геотермального резервуара, где происходит их разогрев, обусловленный присутствием глубинного источника тепла – магматического очага. Важной предпосылкой возникновения геотермального резервуара является наличие плохопроницаемой покрывки, залегающей выше водонасыщенного горизонта. Естественная разгрузка гидротерм осуществляется по ослабленным трещиноватым зонам в пределах покрывки» [Нурмухамедов и др., 2010].

Немало публикаций по применению метода МТЗ, в том числе и на Курило-Камчатской островной гряде, существует у В.В. Спичака, Ю.Ф. Мороза, А.Г. Нурмухамедова, в том числе и в соавторстве [Spichak, 2004; Moroz, Nurmukhamedov, 2004; Антащук и др., 2012] и т.д. Это фундаментальные работы, без изучения которых невозможно проводить и интерпретировать результаты магнитотеллурических исследований на Камчатке. За рубежом это работы ряда авторов [Yu et al., 2008; Abdallah et al., 2020; Ichiki et al., 2021; Díaz Michelena et al., 2022]. Также популярно комплексирование ЭТ с магниторазведкой [Saribudak, 2023; Ledo et al., 2021].

1.6 Комплексные исследования активных вулканов с применением геофизических и геохимических методов

Комплексные методы исследования активных вулканов уже применялись ранее. На вулкане Стромболи (Италия) с помощью электротомографии установлено строение, показывающее наличие геотермальных зон, а также прогнозирующее возможные фреатические взрывы [Finizola et al., 2010]. Коллективом авторов выявлена взаимосвязь удельного электрического сопротивления (УЭС) и концентрации выделяющегося углекислого газа, температуры, результатов георадарной съёмки (рис. 1.10). Также в ходе исследований на глубине 10-15 метров был обозначен уровень гидротермальных вод субпараллельный поверхности. Такой неглубокий уровень гидротермальной жидкости обусловлен произошедшим ранее фреатическим взрывом, который спровоцировал трещиноватость и проницаемость пород, позволяющих флюиду подниматься.

Подобные исследования, но без электротомографии, проводились в Японии, на вулкане Ундзен. Там был освещён не менее важный аспект – связь сопротивления среды с минерализацией растворов и почв, а также температурой [Komori et al., 2010].

Целью данного исследования было сравнить проводимость среды на северо-восточном фланге вулкана Ундзен с проводимостью воды и поверхностной проводимостью твёрдой матрицы с помощью кондуктометрии образцов керна из небольшой скважины USDP-1. Проводимости поровых вод и поверхности были успешно разделены с использованием модели Ревила (рис. 1.11).

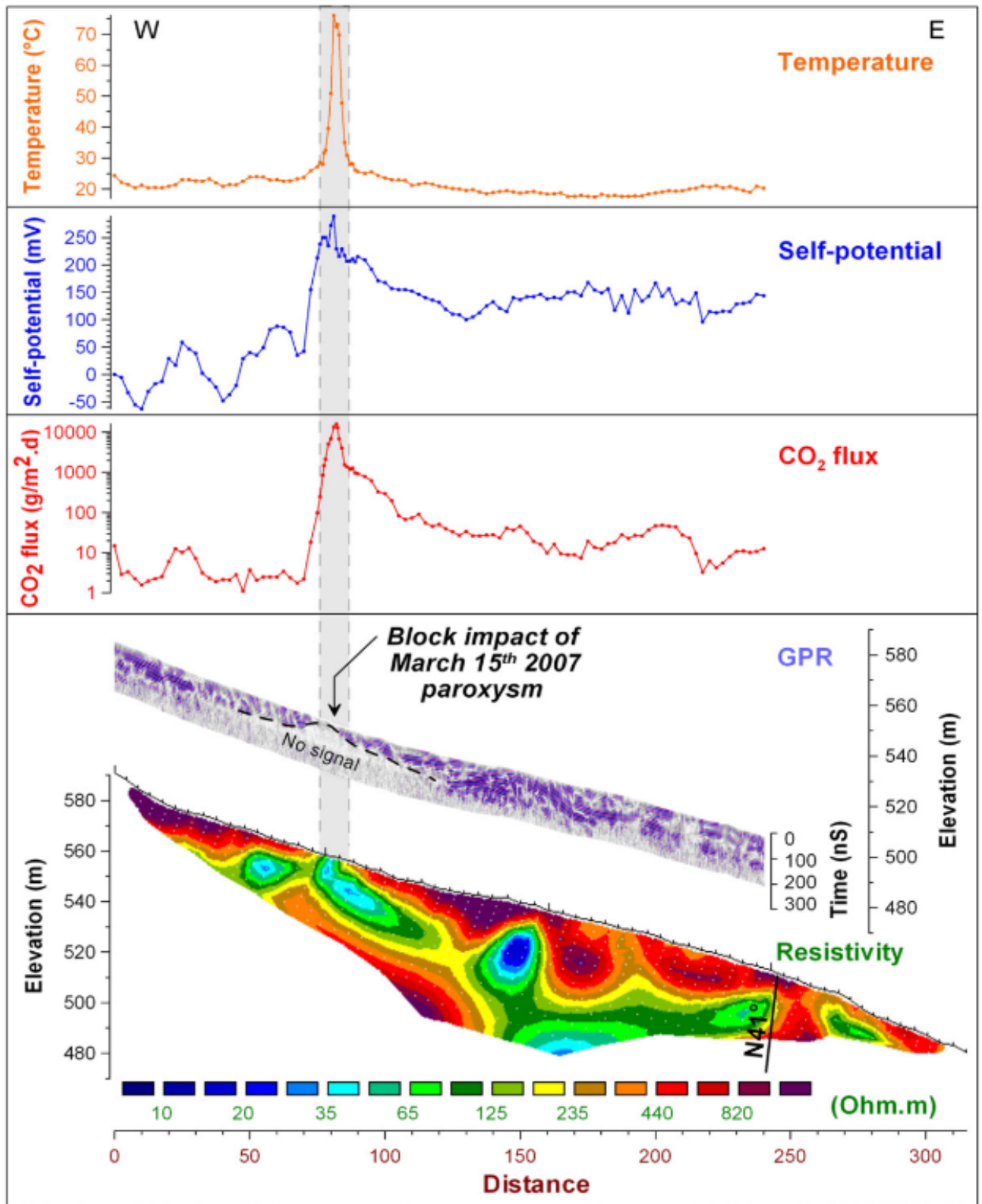


Рисунок 1.10 - Сравнение измерений температуры (с глубины 30 см), собственного потенциала, выделения CO_2 , радиолокационных данных и электротомографии. Аномалии на графике температур, потенциала и выделений CO_2 совпадает с областью, где низкое сопротивление локально достигает поверхности земли [Finizola, et al., 2010]

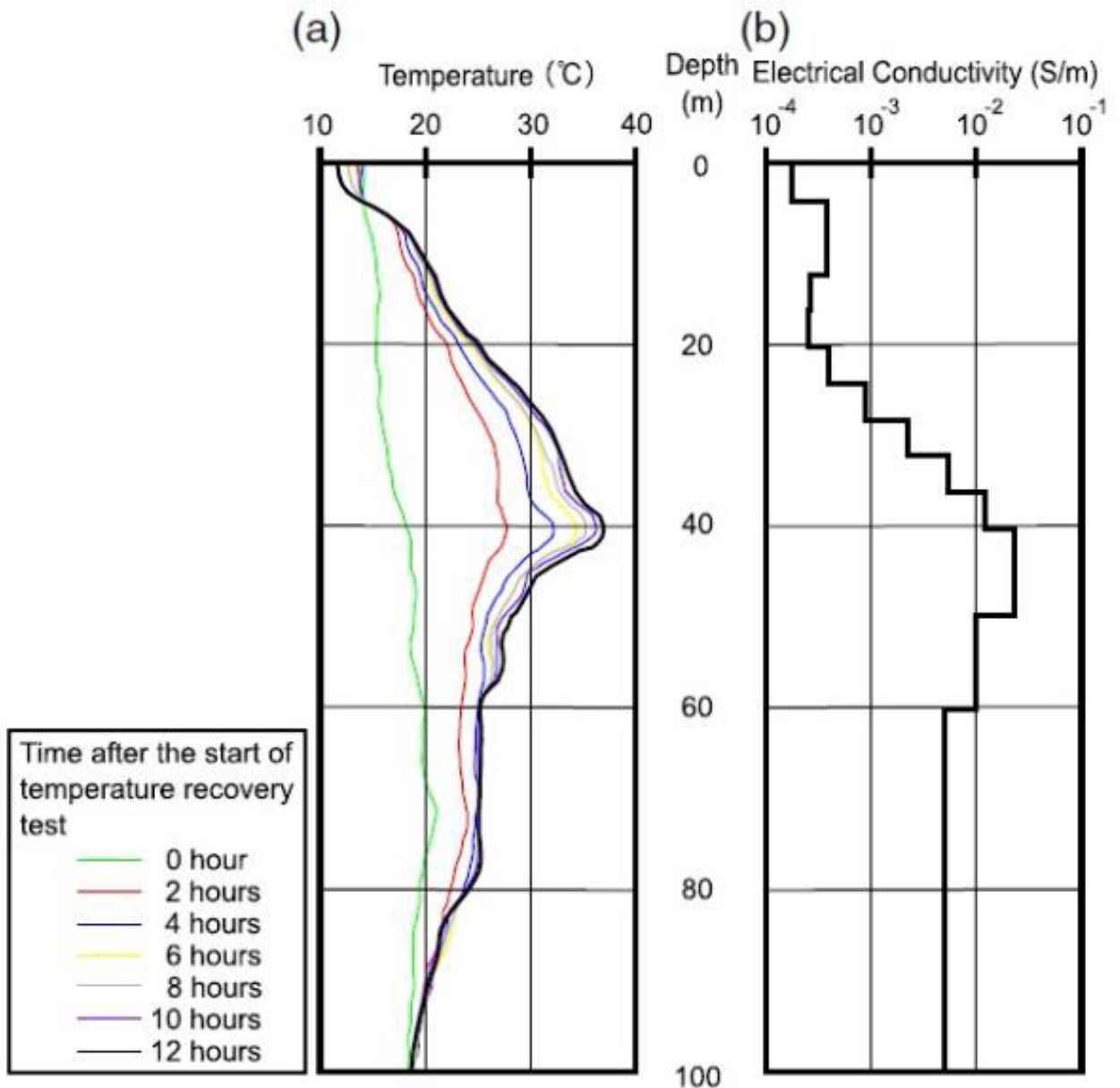


Рисунок 1.11 - Профили электропроводности и температуры в USDP-1. (а) Результат теста «восстановления температуры» (б) Электрическая проводимость структуры. Примечательно, что оригинальный документ использует сопротивление, а не проводимость [Komori et al., 2010].

Также совместно с японскими коллегами Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН проводила анализ особенностей поведения электромагнитного поля Земли в районе пункта «Карымшина» (Южная Камчатка) [Мороз, Мороз, 2011]. В основу анализа положены кривые МТЗ по направлениям, отвечающим простиранию и вкрест простирания Южной Камчатки.

На острове Парамушир (Северные Курилы, Россия) отечественные учёные на основе комплексного анализа геологического строения, изотопно-геохимических и геофизических данных и воксельного (3D) моделирования предложили модель гидротермально-магматической системы Эбеко–Юрьева. В недрах гидротермально-магматической системы, расположенной в районе вулкана Эбеко, существуют различные по времени внедрения субвулканические интрузивные тела, служащие источниками ее теплового питания. Обнаружено, что магма поднимается к поверхности по ослабленной зоне разлома СЗ простирания, выходит на поверхность в районе его пересечения с разломом ССВ направления, поддерживая активность вулкана Эбеко [Хубаева и др., 2022].

В процессе работ выяснено, что амплитудные кривые МТЗ подвержены влиянию не только локальных геоэлектрических неоднородностей, соизмеримых с длиной измерительных линий, но и действию берегового эффекта. При исключении регулярных помех, авторы предполагают наличие глубинного поперечного разлома, повышенная электропроводность которого может быть обусловлена наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов. Работы по магнитотеллурическому зондированию также представляют большой интерес, так как на одном из объектов мною с коллегами был проведён комплекс работ, включающий не только электротомографию, геохимическую и петрофизическую съёмки, но и МТЗ (и, возможно, ЗСБ) [Panin et al., 2015; Kokhanova et al., 2022].

В октябре 2013 года в Южно-Африканской республике прошла конференция «13th SAGA biennial», посвящённая широкому кругу задач геофизики. С точки зрения данной работы, интересными заседаниями в конференции являются следующие: «Применение геофизики в гидрогеологии», «Обработка геофизических данных», «Малоглубинная геофизика», и «Дистанционное зондирование». Также стоит обратить отдельное внимание на заседание «Метод вызванной поляризации».

Оригинальную работу по применению геофизики в гидрогеологии выполнили коллеги из Цюриха [Podgorsky et al, 2013]. В докладе обсуждались

результаты комплексных исследований в дельте Окаванго, где метод становления поля был совмещён с геохимическим опробованием, сейсмическими экспериментами и скважинной геофизикой, с помощью чего авторы смогли выделить три основных слоя, слагающих разрез: наиболее проводящий поверхностный слой; следующий слой со средней проводимостью; нижний слой с высоким сопротивлением. Согласно скважинным данным и пробам грунтовых вод, электропроводящий слой связан с комбинацией глин и насыщенными соевым раствором осадками. Серия сейсмических экспериментов и скважины свидетельствуют о том, что верхний слой состоит из пресноводных отложений, вероятно, представляющих палео-дельту Окаванго, расположенную на подстилающих породах. Если эта интерпретация верна, то глина со слоями палео-озерных отложений Макгадикгади выступает в качестве водоупорной защиты пресноводных отложений от загрязнения соленоватыми водами.

Интересна публикация Жака Депари [Deparis, 2013], где он рассказывает о трёхмерном моделировании на основе геологических и электроразведочных данных, а предметом изучения являются вулканические острова. Понимание функционирования гидрогеологии вулканических островов имеет важное значение не только для управления водными ресурсами, но и для улучшения обеспечения населения. Тем не менее, геологических, гидрологических и гидрогеологических данных зачастую недостаточно для этих целей, и необходимо найти соответствующий подход для улучшения гидрогеологического функционирования этих островов. Автор создал трёхмерную геологическую модель этой области с помощью программы GeoModeller по данным аэрогеофизических исследований. 3D-моделирование различных геологических формаций может очертить структуры, представляющие гидрогеологический интерес. Включения в массиве излившихся лав, характеризующиеся переменным сопротивлением от 30 до 100 Ом•м рассматривались как потенциальные резервуары подземных вод, пока данные не подтвердились бурением. Для воспроизведения результата автор ищет аналогичные структуры.

В интересной работе [Спичак и др., 2007], рассказывается о том, как «на основе комплексного анализа магнитотеллурических данных и информации о коэффициенте тектонической раздробленности (КТР) земной коры, была разработана трёхмерная модель поля сопротивления Эльбрусского вулканического центра. Построенная прогнозная объёмная геоэлектрическая модель содержит два разнесённых по глубине проводящих объекта (рис. 1.12). Верхнекоровый проводник с удельным сопротивлением 25-40 Ом•м, трактуемый как магматическая камера вулкана, и расположенный в диапазоне глубин 0 – 10 км, наиболее интенсивно проявляется на глубине 5 км. Здесь проводник изометричен в плане и по изолиниям 40-60 Ом•м имеет радиус, близкий к 10 км. Локализуемый на средне-нижнекоровых глубинах проводящий объект (удельное сопротивление 10-40 Ом•м), отождествляемый с материнским очагом Эльбруса, наиболее полно проявляется на глубинах 30-40 км, где по изолинии 40 Ом•м его размеры составляют 35 км в широтном направлении и 15 км по долготе. Мощность проводящего ядра этого объекта оценивается в 20 км. Построенная модель может служить основой для решения двух важнейших задач ЭМ мониторинга вулкана: оптимизации сети наблюдений и построения "опорного уровня", на фоне которого будут выделяться временные и пространственные аномалии, связанные с тектонической активностью региона. Для восполнения отсутствующих магнитотеллурических данных в работе предложена оригинальная методология интеграции наземных и спутниковых данных, основанная на разработанном методе максимального корреляционного подобия (МКП). Метод МКП позволяет восполнять пропуски в измеренных на земной поверхности ЭМ данных посредством нахождения корреляционных связей между параметрами сопротивления (электропроводности) и иными геологическими или геофизическими параметрами. Предложенный метод может быть использован для решения других задач, в которых требуется реконструкция отсутствующей геофизической информации по имеющимся спутниковым или наземным данным. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения нейросетевого подхода к комплексной интерпретации геолого-геофизических

данных. Очевидно, что такой подход позволяет расширить набор и повысить информативность параметров, характеризующих изучаемые геологические объекты» [Спичак и др., 2007].

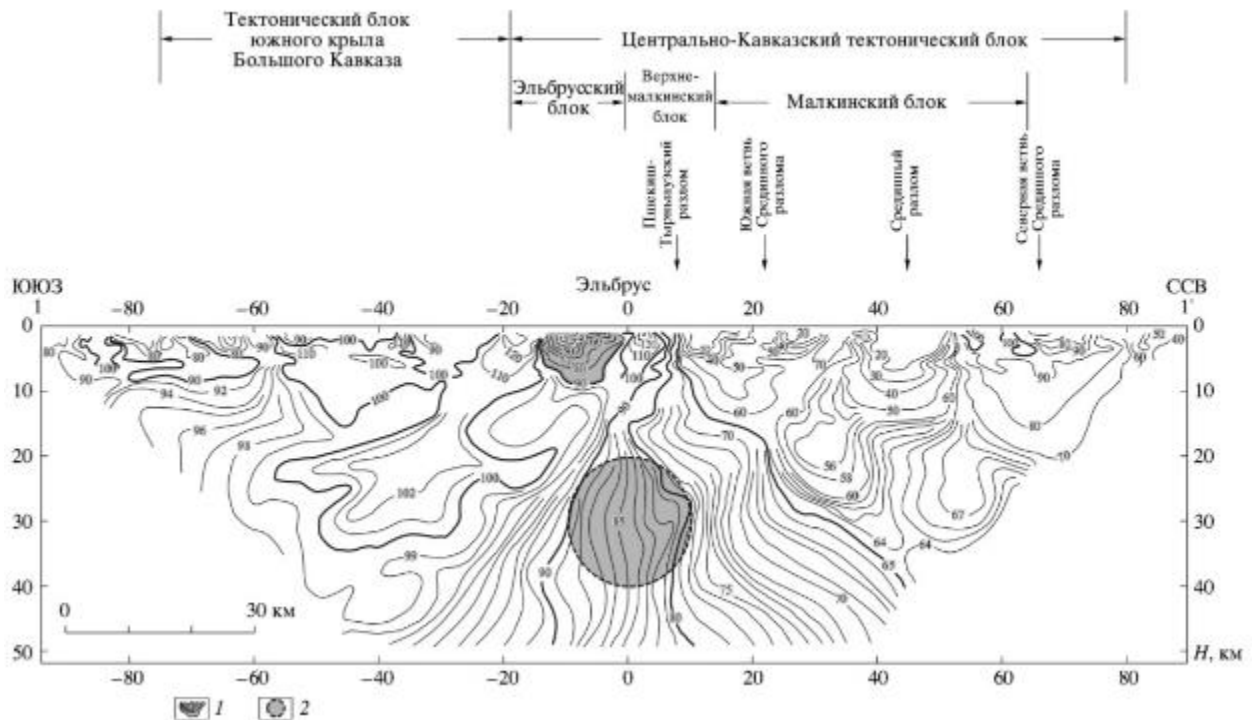


Рисунок 1.12 - Вертикальный разрез поля тектонической раздробленности литосферы (КТР) вдоль профиля 1-1', ориентированного вкострости Кавказа и проходящего через конус вулкана Эльбрус. Взято из работы Спичак «Трёхмерная электромагнитная томография Эльбрусского вулканического центра по магнитотеллурическим и спутниковым данным» Указана привязка профиля к условной системе координат. Изолинии параметра КТР даны в условных единицах. Изолинии без надписей имеют промежуточные значения. 1 - область расположения аномально пониженных значений параметра КТР, отождествляемая с вулканической камерой Эльбруса [Собисевич, 2004]; 2 - область вероятной локализации материнского очага вулкана Эльбрус [Спичак и др., 2007]

Пример комплексного применения геолого-геофизических данных в современных отечественных исследованиях приведён в работе Лубниной, в которой обобщены результаты геофизических исследований, петро-, палеомагнитного и структурно-геоморфологического анализов, позволивших выявить некоторые особенности рудообразования в гидротермальной системе

мыса Фиолент (юго-западный Крым) в условиях островной дуги. Установлено, что основные преобразования пород среднеюрского магматического комплекса мыса Фиолент произошли под влиянием гидротермальных флюидов при внедрении интрузивов кислого состава в интервале 168–140 млн лет назад. Зоны содержат сульфидную минерализацию, основными составляющими которой являются пирит, сфалерит, пирротин, галенит, халькопирит и мышьяковистый пирит. В центральных частях зоны гидротермальных изменений массивные сульфиды сильно выветрены и содержат много вторичных сульфатов [Лубнина и др., 2024].

Что касается современных публикаций, включающих в себя геохимические исследования – подробное описание макрокомпонентного состава и генезиса поровых растворов гидротермальных глин на Паужетке выполнили Сергей Николаевич Рычагов с командой. В работе изучен основной состав поровых растворов гидротермальных глин, образующих протяженные и мощные толщи на термальных полях Паужетского геотермального месторождения. Сделан вывод, что формирование состава и происхождение поровых растворов гидротермальных глин определяются конкретной геологической обстановкой и гидрогеохимическим режимом участков разгрузки восходящих термальных вод [Рычагов и др., 2025].

1.7 Моделирование подповерхностного пространства по данным электроразведки

Что касается 3D-моделирования, об этом в своей работе «Экспериментальная оценка 3D-визуализации геоэлектрических сопротивлений с использованием ортогональных профилей 2D» пишет Айзебекхай [Aizebeokhai et al., 2013]. Численные оценки 3D-моделей геоэлектрических сопротивлений были проведены с использованием набора ортогональных 2D псевдо-разрезов, созданных на основе двух искусственных моделей среды (горст и впадина). Для сбора данных были использованы различные примеры расстановок, включая веннера-альфа, веннера-бета, веннера-шлюмберже, диполь-диполь, поль-диполь и поль-поль. Данные 2D были обобщены в трёхмерный набор данных, а затем инвертировались, была произведена оценка эффективности метода визуализации трёхмерных моделей УЭС. Наблюдаемый эффект аномалии и нормированной чувствительности модели

из массивов показывают, что диполь-дипольная и поль-дипольная расстановки являются более чувствительными для 3D-визуализации, в то время как установка веннера-шлюмберже показывает умеренную чувствительность.

А в работе П. Ньябезе [Nyabeze, 2013] говорится о моделировании электромагнитных электрических свойств среды для характеристики приповерхностных водоносных слоев в провинции Лимпопо с помощью двух разных методов инверсии. Цель этой работы - вывести достоверные модели глубины, которые бы описывали геологические изменения. С помощью электромагнитного индукционного метода и метода электротомографии были исследованы структуры, заключающие в себе подземные воды. В итоге автор приходит к выводу, что интегрированный подход при геофизических исследованиях является важным инструментом для быстрого и экономически эффективного определения геометрии поверхности водоносных слоев.

Интересна также тема вызванной поляризации. Несмотря на известность метода, его применимость пока недостаточно изучена. В работе [Villiers et al., 2013] рассказывает об эффекте вызванной поляризации (ВП) в кислотных подземных водах в золотодобывающем районе Витватерсранда (ЮАР). Кислотные шахтные воды генерируются на месте в кровле и стенах шахт. На золотых приисках при окислении пирита генерируется кислота. Подземные кислоты инфильтратов являются и остаются одной из основных экологических опасностей в районе шахт. Неинвазивные геофизические методы позволяют представить масштабы и структуру потока кислой воды. Эффект ВП в сочетании с методами постоянного тока используется для картирования распространения кислых шахтных вод в рамках программы биовосстановления возле реки Вааль. Также в целях контроля зависимости от времени установлен мониторинг среды. Более того, автор исследует зависимость сигнала ВП от антропогенных шумов.

Про анализ многопараметрических геофизических и геохимических данных активных вулканических систем пишет в своей работе Маури: «Активно действующие вулканы имеют краткосрочные и долгосрочные вариации в их магматических, гидротермальных и/или гидрогеологических системах. Т.к. магма

редко доступна на поверхности, исследование динамического поведения гидротермальной системы является косвенным подходом к изучению основной магматической активности. Вариации объема, массы и направления потока флюида выражаются через изменение и создание локальных нарушений потенциальных полей, таких как гравитационное или поле собственного потенциала. Нахождение источника формирования сигнала потенциального поля не имеет единственного решения, что делает моделирование искомого сигнала довольно трудным. В этом исследовании использованы современная техника анализа сигнала, и масштабная вейвлет томография для точного определения глубины источников. Точность многомасштабной вейвлет томографии по естественному потенциалу данных была протестирована на трех вулканах (Масая, Стромболи, Ваита) в сравнении с глубиной флюидонасыщенных пластов, рассчитанной с помощью более традиционных геофизических методов. Традиционное моделирование обратной силы тяжести также используется чтобы описать граничные условия неединственного решения распространения потенциальных полей. В этой работе рассматриваются два активно действующих вулкана: Масая и Кава Йен. Посредством пространственно-временных профилей выполняется оценка изменений, происходящих в них. Также данное исследование показывает, что хорошо организованная и развитая гидротермальная система может ограниченно проявлять поверхностную активность, как на вулкане Кава Йен. В то время как сравнительно низкая гидротермальная активность может иметь обширную и сложную систему выходов за пределами её активного кратера, как, например, на вулкане Масая. Гидротермальная система вулкана Масая пространственно контролируется кольцевой сдвиговой структурой и оставалась стабильной в период с 2006 по 2009 годы. В отличие от Масая, на Кава Йен активная и хорошо отлаженная система гидротерм, полностью самодостаточна и запечатана в верхней части вулканической постройки, и может высвободиться только под давлением жидкости и газа, за счет активного кратера. Тем не менее, между 2006 и 2008 гг., гидрологическая система показала значительное вертикальное изменение из-за сезонных флуктуаций. Путем интеграции широкого спектра различных,

дополняющих друг друга методов, на активных вулканах в течение продолжительного периода времени, возможно накопление большого объема исходной информации для характеристики компоненты сигналов, обнаруженных на вулканах. Более точное понимание вулканической системы в целом, с помощью тонкой фильтрации различных вулканических сигналов, имеет основополагающее значение в улучшении мониторинга вулканов и уменьшения их опасности» [Mauri, 2009].

Геофизическое обследование грязевого вулкана Чонгелекский, включающее ЭТ и ЕП подтвердило возможность использования данных методов для определения структуры подобных явлений. Выполненные профили позволяют понять структуру грязевого вулкана Чонгелек, что согласуется с геологическими представлениями о его строении [Modin et al., 2020].

Комплексные геофизические исследования (ЭТ с ВП) проводились на знаменитой гидротермальной системе вулкана Стромболи (Эолийские острова, Италия). Трехмерная электротомография, инвертированная с использованием алгоритма Гаусса-Ньютона, демонстрирует проводящее тело, соответствующее выбросам углекислого газа и температурным аномалиям. Совместная интерпретация ЭТ и ВП подразумевает, что изменение (через эффект катионообменной емкости, связанной с глинистыми минералами и цеолитами) играет важную роль как в контроле электропроводности, так и ВП. Авторами обнаружено, что отношение нормализованной поляризации к проводимости указывает на то, что высокие значения проводимости обусловлены поверхностной проводимостью, связанной с глинистыми минералами, образовавшимися в результате гидротермального изменения вулканических пород. В свою очередь, это означает, что ЭТ можно использовать для оценки распределения температуры внутри вулкана [Revil A. et al., 2023].

На Дальнем Востоке выполнялся анализ геолого-геофизической информации о Пугачевской группе грязевых вулканов, расположенных в зоне субмеридионального Центрально-Сахалинского разлома. Результаты геоплотностного и геотермического моделирования по двум пересекающимся

профилям, проходящим через центральный участок Пугачевской площади, показали, что в разрезе поздне меловых отложений этой площади, приуроченной к разломной зоне, выделена субвертикальная узкая аномально разуплотненная зона конусообразной формы, которая расширяется от 1 км на поверхности до 4 км в ее основании на глубинах более 6 км. Основной резервуар газов, периодически выбрасываемых Пугачевским грязевым вулканом, находится в тектонически ослабленной разломной зоне на глубинах 4.5-5.6 км. Пугачевская площадь перспективна на содержание промышленных залежей углеводородов [Веселов и др., 2012].

Многие комплексные исследования проводились на Камчатке, например, комплексирование методов магниторазведки, гравиразведки, микросейсмического зондирования, термометрии и электроразведки, включающей ВЭЗ, ЕП, АМТЗ и МТЗ выполнено Феофилактовым С.О. и описано в его кандидатской диссертации. Аналитически установлено, что разгрузка термальных вод в структуре Паужетской гидротермальной системы и геотермального месторождения приурочена к кольцевым тектоно-магматическим блокам диаметром 300-500 м. В верхних горизонтах этих блоков локализованы основные термальные поля: Восточно-, Верхне-, Нижне- и Южно-Паужетское. Автором получены геофизические, геологические и геотермические данные, свидетельствующие о том, что формирование структуры зон разгрузки парогидротерм на Паужетском геотермальном месторождении продолжается в настоящее время, а также решен принципиальный вопрос об источнике теплового питания Паужетской гидротермальной системы: в рассмотренном блоке земной коры между кристаллическим и терригенным фундаментами на глубине от 3.5 до 8 км выделен горизонт повышенной проводимости для теплового потока, восходящего из недр Камбального вулканического хребта. Показано, что выступы терригенного и кристаллического фундаментов, представленные крупными интрузивными комплексами или тектоническими блоками, характеризующимися низкой электропроводностью пород, определяют повышенную раздробленность и проницаемость земной коры в районе Паужетского геотермального

месторождения. Участки близповерхностной тектоно-магматической активности, такие как кольцевые структуры в районе термальных полей Паужетского месторождения, служат каналами, связывающими глубинный тепловой поток с зонами разгрузки парогидротерм [Феофилактов, 2022].

Множество комплексных исследований по активным вулканам Камчатки выполнены ИВиС ДВО РАН, командой Рычагова [Рычагов, 2008; Нуждаев, Феофилактов, 2013; Феофилактов и др., 2021]. Если говорить о верхней части разреза, затрагивающей первые сотни метров, то на основании комплексных структурно-геофизических исследований и обобщения геофизических, гидрогеологических, минералого-геохимических данных сделаны выводы о строении зоны разгрузки парогидротерм Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) до глубины около 300 м. Установлена структурная и гидродинамическая связь двух термальных полей этой группы: предполагается единое тепловое питание геотермальной системы Камбального хребта, объединяющей все основные группы термальных полей [Нуждаев и др., 2024]. Но первые десятки метров, детальное строение подповерхностных систем разгрузок также остаются не описанными.

1.7 Выводы

За последние пять лет (2020 – 2025 года) написано немало работ о комплексировании методов электроразведки в разных её модификациях [Модин и др., 2022; Модин и др., 2023] с различными методами исследования, включающими гидрогеологическое картирование [Fadillah et al., 2023], газоэманационную съёмку [Miller et al., 2020], археологические раскопки [Осипова и др., 2023], мюографию, гравиметрию, сейсмический и температурный мониторинг [Gibert et al., 2022], а также проводились глубинные исследования исключительно с помощью электротомографии [Balasco et al., 2022]. Однако на выбранных автором объектах подобного рода исследования и расчёты произведены впервые.

Глава 2. Объекты исследования

Выбранные объекты находятся в пределах Курило-Камчатской островной дуги, где идет субдукция Тихоокеанской плиты под Евразийскую (рис. 2.1). Восточное побережье Камчатки на значительном протяжении может рассматриваться как единая вулканическая область. Морфологическая особенность района, отличающая его от других вулканических районов Камчатки, состоит в обилии вулканических сооружений, сосредоточенных на небольшой территории – плотность вулканического ряда для Камчатского пояса на этом отрезке наивысшая [Троицкий, 1947; Kalacheva et al., 2017; Veselov et al., 2021; Kiryukhin et al., 2022; Kiryukhin et al., 2025]. Одной из общих черт объектов является основной тип вулканизма, состав вулканических построек - преимущественно андезиты и андезидациты с разнообразными вариациями [Селянгин, 2016]. С точки зрения геологии, Узон, Мутновский, Академии Наук и Эбеко объединяет то, что все они являются крупными вулканическими и гидротермальными системами с кальдерным происхождением, связанными с активной тектонической и магматической деятельностью региона.

Эти объекты представляют разные проявления посткальдерного вулканизма и гидротермальной активности, демонстрируя, как магматические процессы формируют уникальные геологические и геотермальные ландшафты. Узон, Мутновский и Академии Наук входят в список ЮНЕСКО как часть природного наследия «Вулканы Камчатки». Эбеко же и Мутновский объединяет наличие удивительных по составам источников – контрастные в пределах одного термального поля, ультракислые и высокоминерализованные растворы.

Термальные воды, разгружающиеся на склонах и в кратерах активных вулканов, часто представляют собой контрастные типы растворов как по физико-химическим параметрам, так и по содержанию широкого круга элементов [Aisurra et al., 2000; Varekamp et al., 2009; Bortnikova et al., 2010; Taran, Kalacheva, 2023; Taran, Kalacheva, 2024]. Большая разница указанных параметров характерна не только для разных вулканов, но обнаруживается в пределах одного вулкана и даже на локальных термальных полях. Высокие содержания химических элементов в

термальных источниках Мутновского вулкана, в том числе редкоземельных и платиноидов, отличаются от известных ранее в аналогичных вулканических районах мира на один-два порядка [Гавриленко и др., 2007; Манштейн и др., 2008; Калачёва, 2025]. Карымское озеро имеет сульфатный натриево-кальциевый состав, а источники Академии Наук – высокоминерализованные хлоридно-натриевые, близкие к Узон-Гейзерной системе [Карпов, 2004]. Источники вулкана Эбеко – сульфат-хлоридные, ультракислые, высокоминерализованные.

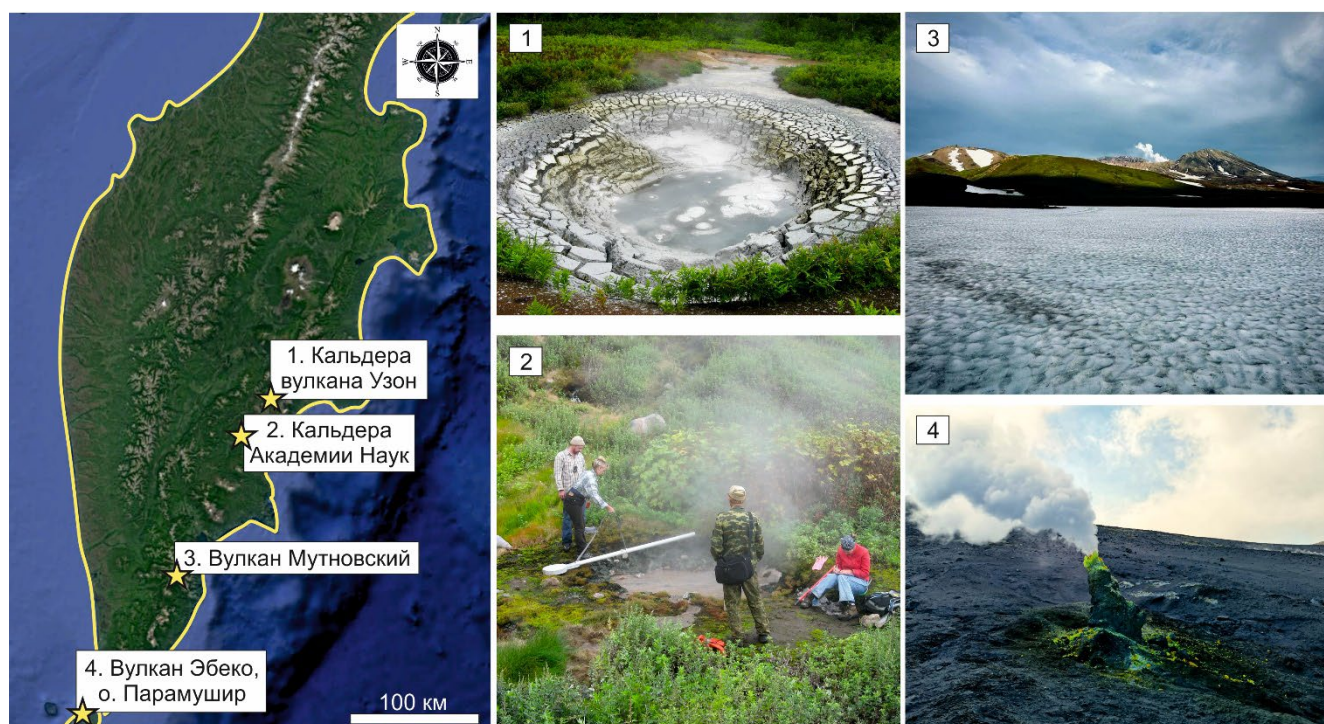


Рисунок 2.1 – Слева - объекты исследования на космоснимке сервиса Google Earth от 01.2021 г. в приближении с высоты 1 км. На photographs – термальные источники и общий вид объектов исследования соответственно номерам с космоснимка

Кальдера Узон

Кальдера вулкана Узон – одна из 37 больших кальдер Камчатки, она образовалась в результате сильных извержений вулкана Узон. Это большая впадина около 10 километров диаметром и площадью 150 км². В строении района выделяется три комплекса пород – докальдерный, синхронный с кальдерообразованием и посткальдерный. В докальдерный период происходили извержения основных и кислых вулканитов. Формирование самой кальдеры

произошло около 40 тысяч лет назад. В посткальдерный этап выделяется три этапа активности, каждый из которых характеризуется взрывной и экструзивно-эффузивной стадиями. Во время экструзивно-эффузивных стадий наблюдается последовательное поступление на поверхность лав, изменяющихся по составу от андезитов до риолитов. В историческое время в районе Узон-Гейзерной депрессии происходили только фреатические извержения, образовавшие все термальные озера и грифоны крупных термальных источников [Федотов, Масуренков, 1991].

Эффузивы кальдеры Узон относятся к известково-щелочному типу и характеризуются широким спектром пород - от базальтов до риолитов. В докальдерный этап развития преобладали базальтовые лавы. В них минералы-вкрапленники представлены высокоосновным плагиоклазом (анортит-лабрадор), клинопироксеном диопсид-авгитового ряда и оливином переменной железистости. Во время кальдерообразования произошел выброс значительного количества игнимбритов, по составу отвечающих андезитам и дацитам. Циклические посткальдерные извержения представлены лавами андезитов – риолитов. [Бортникова и др., 2013].

В восточной части кальдеры расположена одна из крупнейших на Камчатке взрывных воронок диаметром 1.65 км, которая занята озером Дальним. Остальное пространство занято болотистой местностью, кустарниками, многочисленными термальными проявлениями, объединёнными в термальные поля (рис. 2.2).

Немало работ посвящено изучению сейсмотектонического фона кальдеры вулкана Узон в составе других действующих вулканов Курило-Камчатской островной дуги. Также исследователи описывали положение магматических камер вулканов, выполняли электротомографию на наиболее активных термопроявлениях кальдеры [Муравьев и др., 2010, Добрецов и др., 2012, Модин и др., 2023]. Однако детальных исследований на поверхности термальных полей, связи геохимических параметров с подповерхностным пространством произведено не было.



Рисунок 2.2 – Профиль ЭМС по грязевым котлам кальдеры вулкана Узон.

На фото Г.А. Карпов, Ю.А. Манштейн, фото автора

Кальдера Академии Наук

Карымский вулканический центр, которому принадлежит кальдера Академии Наук, расположен в пределах Восточного вулканического пояса, в 124 км северо-восточнее г. Петропавловск-Камчатский, вблизи Кроноцкого залива. Имеет размеры 55×65 км и представляет собой сложное структурное образование, состоящее из множества вулканических построек дифференцированного состава и ряда кальдерных структур, динамически развивающихся во времени, начиная с эоплейстоцена (около 2 млн. лет назад) до настоящего времени. Сам вулкан Карымская сопка – действующий, хоть и относится к стратовулканам [Гришин, 2017; Добрецов и др., 2012; Кирюхин и др. 2017]. Карымское озеро, расположенное в 6 км южнее Карымского вулкана, заполняет позднеплейстоценовую кальдеру Академии Наук, которая в свою очередь вложена в кальдеру вулкана Однобокого, образовавшуюся ~70 тыс. л.н. [Портнягин и др., 2011] (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Вулкан Карымский, вид с озера Карымского, расположенного в кальдере Академии Наук. Фото Бортниковой С.Б

В результате кратковременного (в течение суток), но мощного фреато-магматического извержения преимущественно базальтового состава 2 января 1996 г. в северном секторе кальдеры Академии Наук, заполненной озером Карымским, возник кратер глубиной около 58 м, северный и северо-восточный борта которого причленились к берегу, и образовали п-ов Новогодний площадью 0,47 км² [Лаверов, 2005; Федотов, 1997; Белоусов, 2006].

Мощные волны цунами в процессе извержения существенно разрушили основание северного борта кальдеры и смыли с его поверхности ольховый и кедровый стланик, а также аллювиально-пролювиальные отложения в районе источников Академии Наук, обнажив толщу гейзеритов. Уровень воды в озере поднялся почти на 4 м [Карпов и др., 2013].

На полуострове Новогодний сразу после извержения образовались три воронки, в которых бурлила термальная вода с температурой до 79°C, крупная воронка маарового типа, заполненная водой, прогретой до 35°C, и имеющая в бортах участки с температурой до 55°C, а также две мелкие воронки – термальные площадки, на которых активно отлагались возгоны сульфатов и серы [Вергасова и др., 1998; Карпов, 2007; Портнягин и др., 2011].

В данной работе рассматриваются источники кальдеры Академии Наук, в частности – ручей Горячий, кратер Токарева, источники Медвежьи, и собственно источники Академии Наук (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Под номером 1 – система источников Академии Наук с озера; 2, 3, 4 – примеры термальных котлов Академии наук; 5 – пробоотбор на ручье Горячем; 6 – кратер Токарева, заполненный водой, фото с полуострова Новогодний. Все фото, кроме 5 – Бортниковой С.Б., фото 5 – автора

Вулкан Мутновский

Вулкан Мутновский расположен на северо-восточной оконечности Южно-Камчатской вулканической зоны, входит в состав Восточно-Камчатского вулканического пояса и расположен в 75 км от г. Петропавловск-Камчатский. Это один из самых больших и наиболее активных вулканов Южной Камчатки. Фундамент вулкана сложен вулканогенно-осадочными и вулканическими отложениями палеогена - раннего-среднего плейстоцена – туфо-конглобрекциями, туфопесчаниками и алевролитами, лавами и субвулканическими телами основного, среднего и кислого состава. В позднем плейстоцене на этом фундаменте началось формирование вулканической постройки Мутновского вулкана, которое продолжается до настоящего времени [Бортникова и др., 2013].

Изучение истории активности вулкана Мутновский показывает, что он прошел стадию роста еще в позднем плейстоцене. В голоцене для него была характерна эксплозивная деятельность умеренного характера с преобладанием слабых и средних по силе (преимущественно фреатических) извержений и полное отсутствие излияний лавы. В прошлом наряду с фреатическими происходили извержения с выносом ювенильного материала базальтового состава. Материал последних извержений, начиная с 1904 г., был резургентным, что установлено для извержений 1927-1929, 1960-1961, 2000 и 2007 гг. [Вакин и др., 1966; Гавриленко и Гавриленко, 2004; Зеленский и др., 2002].

Постройка вулкана имеет максимальную высоту 2323 м. В периоды «затишья» активность вулкана реализуется через обширную сеть термопроявлений в активных кратерах и многочисленных термальных площадках (рис. 2.5). Самыми крупными проявлениями активности в том районе являются Донное и Северо-Мутновское термальные поля [Селянгин, 1993].

Площадка Донного фумарольного поля усеяна парогазовыми выходами, кипящими котлами величиной от 0,3 до 1,5 м в диаметре. И физико-химические параметры (кислотность, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность) и концентрации макро- и микроэлементов в растворах

колеблются в очень широких пределах даже в близко расположенных котлах [Бортникова и др., 2009].

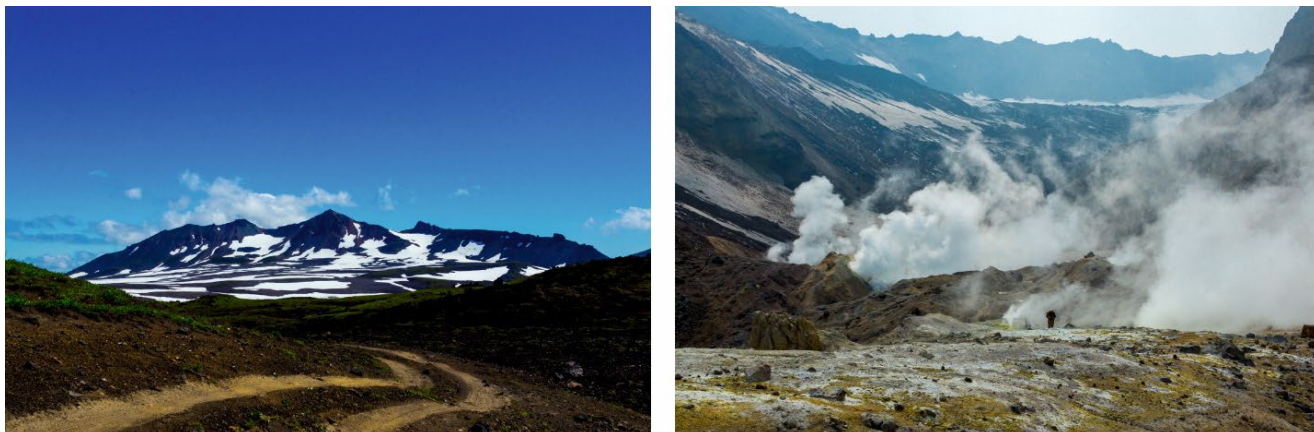


Рисунок 2.5 - Слева-направо: вулкан Мутновский, Донное термальное поле в кратере вулкана. Фото А.Н. Фаге

Из-за высокой сейсмической активности и постоянного «сейсмического дрожания» земной коры [Кирюхин и др., 2005], на Донном поле наблюдается смещение мест и интенсивности фумарол и термальных источников. По-видимому, по этой причине на нем возникают аномальные по составу источники.

Вулкан Эбеко

Курило-Камчатская островная дуга связана вулканическим поясом и единой зоной субдукции Тихоокеанской плиты под Охотоморскую [Сафонов, 2019], поэтому вулканы, принадлежащие ей, могут рассматриваться совместно. Эбеко - действующий стратовулкан, находится в северной части хребта Вернадского острова Парамушир. Постройка вулкана сложена лавами и пирокластическим материалом андезитового и андезибазальтового состава. Известны его извержения 1793, 1895, 1934-1938, 1967-1971, 1987-1991 гг. 2016 - по настоящее время [Меняйлов и др., 1992; Мелекесцев и др., 1993; Панин и др., 2015]. Поскольку Эбеко — один из самых активных вулканов Курильской островной дуги, производящий частые слабые вулканические взрывы с эруптивными облаками высотой до 5 км, вулкан представляет серьёзную угрозу для города Северо-Курильск с населением около 2500 жителей, расположенного всего в 7 км от него на конусе выноса лахаровых отложений вулкана (рис. 2.6). Три из его исторических извержений (1934–1935, 1987–1991 и 2016 – по настоящее время) включали свежую магму, тогда как во время остальных (1967–1971, 2009–2011) свежая магма не извергалась [Belousov et al., 2021].

Функционирование гидротермальной системы влк. Эбеко было выражено в нескольких фумарольных и термальных полях на его склонах и внутри кратеров, а также реки Юрьева, наиболее полноводной кислой реки мира [Котенко и др., 2012; Котенко и др., 2019]. Северо-восточное фумарольное поле вулкана Эбеко являлось достаточно стабильным проявлением гидротермальной деятельности вулкана. Поверхностные разгрузки проявлялись в виде активных кипящих водных и грязевых котлов с кислой и ультракислой средой [Бортникова и др., 2006]. Помимо водных источников на поле функционировали многочисленные серные фумаролы и термальные площадки, на которых шло интенсивное современное минералообразование из парогазовой смеси [Панин и др., 2015]. Однако, по последним данным, с 22 января по 13 июня 2022 года происходили фреатические взрывы в кратерном озере, вызванные просачиванием воды сквозь образовавшуюся

в верхней части магматического канала пробку и ее вскипанием. С 14 июня начались эксплозии вулканского типа, уничтожившие кратерное озеро [Котенко и др., 2023]. В июне 2023 года два фумарольных поля вблизи активного кратера оказались засыпаны пирокластикой. Новые термальные аномалии с парогазовой разгрузкой стали последствием фреатических взрывов 8-15 августа 2024 г. в Среднем и Северном кратерах вулкана [Котенко, 2025].



Рисунок 2.6 – Извергающийся вулкан Эбеко. Фото автора из двора г. Северо-Курильска в 2021 году.

Множество работ написано об этом действующем вулкане, его извержениях и термальных полях за последние полвека благодаря его доступности и расположению в непосредственной близости от города Северо-Курильска [Рычагов и др., 2003; Shevko et al., 2018; Котенко, Калачева, 2021; Калачева, Волошина, 2022; Котенко и др., 2022]. За последние несколько лет были выполнены масштабные

работы по изучению глубинного строения вулкана. В сейсмотомографической модели четко выделяется глубинный магматический источник вертикальной формы, верхняя граница которого лежит на глубине 5 – 6 км от поверхности [Koulakov et al., 2021]. Выше прослеживается сложная сейсмическая структура, которая может указывать на место скопления термальных вод, разогретых магматическим очагом. Эти аномалии позволяют определить пути питания главного вулканического конуса, отдельных фумарольных полей и горячих источников [Смирнов, Кулаков, 2021]. Что касается верхней части разреза – последних десятков метров у дневной поверхности, на вулкане выполнялись электроразведочные работы, в том числе с участием автора [Панин и др., 2010; Панин и др., 2015; Грахова и др., 2018; Котенко и др., 2018; Kokhanova et al., 2022]. Об одном из этих исследований и пойдёт речь в данной работе.

Выводы

Выбранные объекты не случайно оказались в данной работе: на каждом из них произведён уникальный комплекс работ, позволяющий смоделировать верхнюю часть подповерхностного пространства термальных полей, обнаружить геоэлектрическую зональность, подтверждаемую геохимическим опробованием.

Глава 3. Методы исследования

На изучаемых вулканах проводился широкий спектр комплексных работ: электротомография, частотное электромагнитное индукционное зондирование, геохимическое опробование с последующими лабораторными анализами. Эти методы выбраны неслучайно: ни в одной из современных публикаций не описывается с достаточной детальностью верхняя часть разреза, а именно – первые метры у поверхности, с помощью визуализации которых можно представить пути разгрузки вещества, потенциальные соединения подводящих каналов, обнаружить закономерности в их строении. Более того, выбранные методы обладают достаточной мобильностью исследования – каждый из объектов уникален в своём расположении, и требует индивидуального подхода. Если для Донного термального поля Мутновского вулкана существует пешеходная тропа от дороги до Мутновской ГеоЭС, и есть возможность добраться пешком, преодолев около 20 км пешего маршрута с превышением в 1000 м и грузом аппаратуры, то кальдеры вулканов Узон и Академии Наук лишены такой роскоши, и добраться до них можно лишь на вертолёте. Соответственно, выбор методов ограничен: это должны быть строго помещающиеся в багаж приборы и аппаратура, которые в состоянии нести на себе, разделив, несколько человек, а также лимитированное количество проб, которое можно будет вынести с вулкана. Приборы метода электротомографии включают в себя две электроразведочные косы весом по 16 кг, прибор 16 кг, набор электродов и клипс к косам – порядка 9 кг, а также аккумулятор весом 12-16 кг. Прибор частотного электромагнитного индукционного зондирования (ЭМС) разделяется на блок генератора и измерителей, и весит около 8 кг. Эффективность применения данных методов вкуче не раз подтвердилась на практике и описана во многих публикациях [Манштейн и др., 2015; Эпов и др., 2016; Балков и др., 2021; Панин и др., 2022; Балков и др., 2023]. Располагая данными приборами, исследования решено было вести комплексно, с самых первых полевых выездов. В течение многих лет методики измерений, отбора образцов, химических анализов *in situ*, постоянно модифицировались и совершенствовались.

3.1 Методика полевых геофизических работ

Задачей геофизических исследований было определение геометрии флюидоподводящих каналов, объемной глубинной структуры газо-гидротермальных зон и геотермальных резервуаров методами электротометрии. Для оперативного получения результата (проверка качества измерений непосредственно на объекте), возможности кратковременных работ в промежутки между непогодой и ввиду аппаратурных возможностей коллектива были выбраны два эффективных метода малоглубинного зондирования: электротомография и частотное зондирование.

3.1.1 Частотное зондирование

В статье Романова [Романов, Манштейн, 2011] рассматривается принцип действия и очевидные преимущества аппаратурно-программного комплекса ЭМС над его аналогами. Именно этим комплексом проводились частотные зондирования на Мутновском вулкане в 2007 – 2013 гг. Согласно инструкции к аппаратурно-программному комплексу ЭМС (производство ООО «КБ Электротометрии»): «данная аппаратура предназначена для исследования распределения электропроводности на глубину до 10 метров. Зондирование выполняется посредством последовательного измерения тока в генераторе и эдс в приемнике на 14 дискретных частотах гармонического сигнала в диапазоне частот $f = 2,5 \div 250$ кГц. Глубина зондирования пропорциональна $\frac{1}{\sqrt{f}}$ » [Балков, Манштейн, 2001; Панин, 2010; Панин и др., 2022].

Устройство представляет собой трёхкатушечный индукционный зонд с вертикальными магнитными моментами, расположенными в одной плоскости (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 - С.Б. Бортникова и А.К. Манштейн выполняют исследования на ручье Горячем кальдеры Академии Наук (слева) и над кипящим котлом кальдеры Узон (справа) прибором ЭМС

Диапазон измерений входного сигнала приемника от 1 до 500 мкВ, с неопределенностью $\pm 0,02$ мкВ при $P=0,95$. База прибора 2.75 м, шаг измерений ~ 1 метр, характеристики прибора представлены в таблице 3.1. Информация о геоэлектрическом разрезе в параметрах кажущегося удельного электрического сопротивления вычисляется на основании данных о токе и амплитуде сигнала для измерения на каждой из частот. В процессе зондирования в реальном времени контролируется получаемый в виде карт или разрезов первичный материал о распределении геоэлектрических параметров среды. В основе интерпретации данных частотного зондирования лежала программа ISystem, которая разработана в ИНГГ СО РАН для аппаратуры ЭМС [Балков, Манштейн 2001].

Таблица 3.1 - Технические характеристики ЭМС [Сайт ООО «КБ Электротометрии»].

Частотный диапазон:	2,5-250 кГц (14 частот)
Время измерения:	0,2-2 с (в зависимости от количества выбранных частот)
Мощность генератора:	90 Вт
Чувствительность приемника:	1 мВ
Габариты в собранном состоянии:	275·30·10 см
Время работы батареи:	12 часов
Вес прибора:	12 кг

Частотное зондирование производилось на каждом из объектов.

3.1.2 Электротомография

Основным отличием электротомографии от классических вертикальных электрических зондирований является использование многоэлектродных электроразведочных кос и полная автоматизация измерений. В работе [Loke and Barker, 1996] показано, что область наибольшей чувствительности для метода электротомографии совпадает с областью заполнения вертикальной плоскости точками измерений и представляет собой трапецевидную фигуру. Именно эта область участвует в инверсии и для нее выполняется интерпретация.

Большая часть представленных в работе исследований методом электротомографии выполнена прибором «Скала-48» [ООО «КБ Электротометрии»] и его многоканальным аналогом – «Скала-48к12» (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 - Многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48» в процессе исследований на Донном термальном поле вулкана Мутновский.

Внешний аккумулятор закрыт от парогазовой взвеси и тумана

При стандартной расстановке к прибору подсоединяются 2 косы по 24 электрода каждая, шаг между электродами составляет 5 метров, но может быть изменён на меньший. В зависимости от величины межэлектродного расстояния варьирует разрешающая способность прибора. Через равные промежутки к косе подсоединяются клипсы, вторым концом соединённые с электродами. Обычно это гвозди стандартного сплава, 300 мм – именно такой величины электрода достаточно для качественного заземления и правильной работы ПО.

Далее прибор подаёт ток известного напряжения, и по сигналу отклика можно судить о разрезе. Каждый профиль электротомографии может быть рассмотрен как по отдельности, так и в составе трёхмерного массива данных.

Стандартная методика измерений при трёхмерных исследованиях представляет собой набор продольных и поперечных профилей, сшивающихся в единый массив данных с помощью ПО. Такой вид зондирования вынуждает интерполировать данные на участках исследуемой площадки, между соседними профилями (рис. 3.3, а). Этот прием не вполне корректен, поскольку является псевдо-3D [Фадеев и др., 2014].

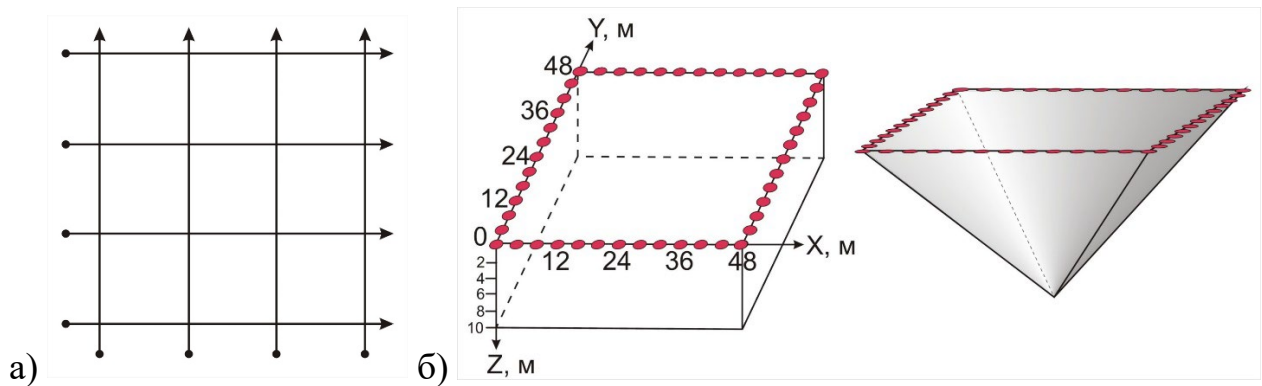


Рисунок 3.3 - а) Стандартная сетка измерений при выполнении трёхмерной томографии; б) Раскладка кос с применением конфигурации «квадрат»

В 2013 году была применена технология трёхмерных измерений, но не в классическом варианте, «змейкой», а в конфигурации «квадрат» (рис. 3.3, б). В такой схеме полученный массив данных захватывает весь объём изучаемой среды. Были проведены измерения на квадратной площадке со стороной 36 м, с шагом между электродами 3 м. В результате полевых работ получено более 7500 точек записи на каждом из трёх участков. Измерения проводились аппаратурой **IRIS Syscal Pro Switch 48** (IRIS Instruments, Франция).

Syscal Pro является новейшей многоканальной аппаратурой для высокопроизводительных измерений методом сопротивлений и вызванной поляризации. Она применима практически в любых условиях при инженерно-геологических, гидрогеологических, экологических и т.п. работах. Имеет встроенный генератор мощностью 250 Вт, максимальная сила тока - 2.5 А; максимальное выходное напряжение – 800 В. Измеритель позволяет проводить измерения одновременно для 10 диполей.

Также были выполнены исследования методом микротомографии (рис. 3.4): шаг между электродами составляет 0.3 м, 48 электродов, общая длина расстановки – 14 метров.

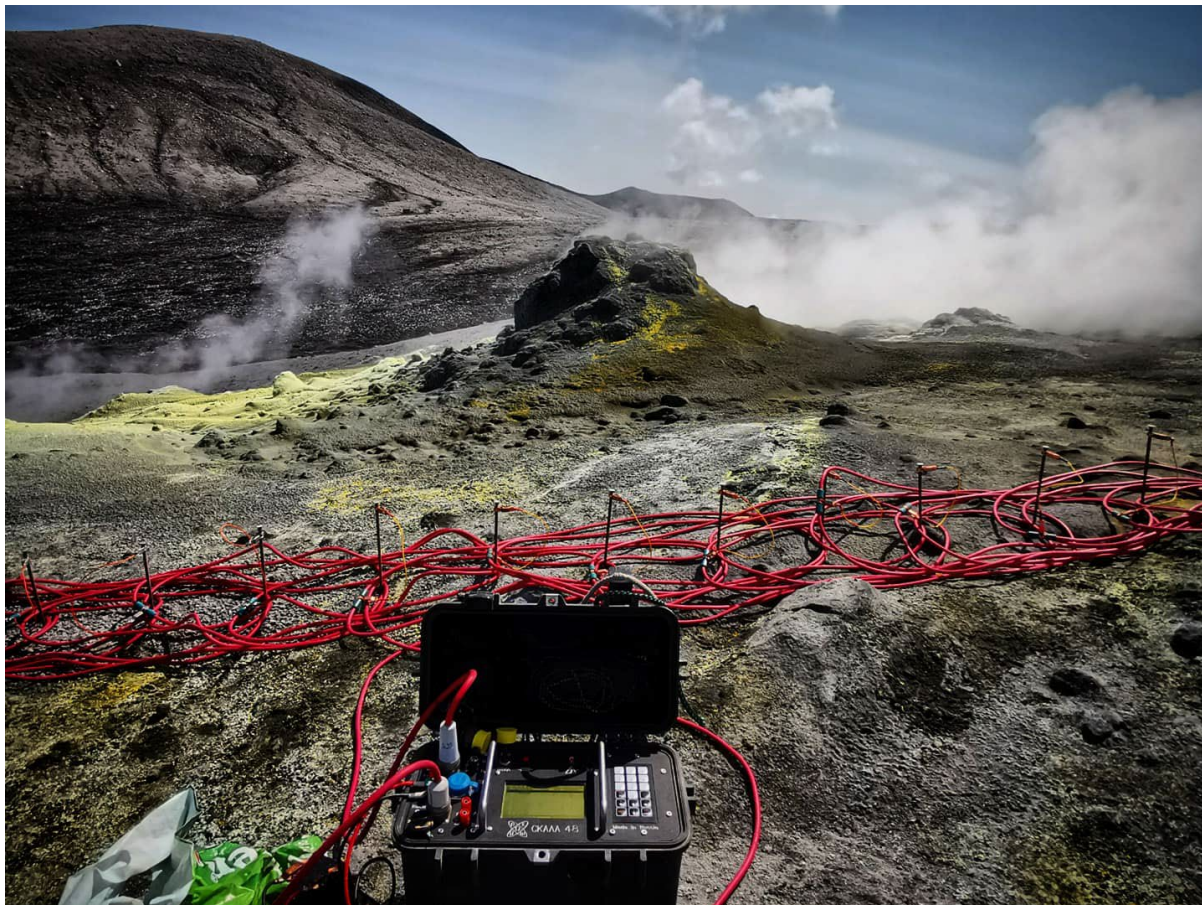


Рисунок 3.4 – «Скала-48» и раскладка пятиметровых электроразведочных кос в конфигурации микротомографии (межэлектродное расстояние 0.3 м) в кратере вулкана Эбеко

3.2 Методика полевых геохимических работ и характеристики приборов

Геохимическое опробование выполнено на всех изучаемых термальных полях, на Мутновском вулкане и в кальдере Академии Наук – не единожды. Были опробованы практически все виды источников:

- холодные ручьи, протекающие в непосредственной близости от термальных полей;
- резервуары со стоячей холодной и тёплой жидкостью от прозрачного до бордово-красного и насыщенно-чёрного цвета;

- условно прозрачные кипящие котлы;
- небольшие водоёмы со стоячей водой, питающиеся снежниками и прочими осадками;
- кипящие грязевые котлы любых оттенков и густоты.

Пробы термальных растворов из котлов отбирались фторопластовым пробоотборником, любые контакты с металлами были исключены (рис. 3.5). При опробовании водных растворов на месте после некоторого отстаивания взвеси автором измерялись физико-химические параметры: температура ($T^{\circ}\text{C}$, прибором Термометр лабораторный ЛТ-300, таблица 3.4), кислотность (рН, прибором HANNA), окислительно-восстановительный потенциал (Eh, мВ, прибором HANNA); содержание некоторых анионов: Cl^- , F^- , NO_3^- , NO_2^- (прибором Эксперт – 001-3, таблица 3.2).



Рисунок 3.5 - Процесс пробоотбора вещества стенок термального котла в кальдере вулкана Узон для анализа, С.Б. Бортникова, автор. Фото А.К. Манштейна

Таблица 3.2 - Характеристики анализатора Эксперт 001-3

Число измерительных каналов	4
ЖК-дисплей	цифробуквенный (цб)
Диапазон измерения рН, ед. рН	1... +14
Диапазон измерения рХ, ед. рХ	-2... +20
Точность, рН (рХ)	± 0,02
Диапазон измерения ЭДС, мВ	± 3200
Точность, мВ	± 1,5
Диапаз. измер. температуры, 0 С	-5...+150
Точность, 0 С	± 0,5

Концентрацию анионов Cl^- , F^- , NO_3^- , NO_2^- определяли с помощью ионоселективных электродов Эллис-131 Cl, Эллис-131 F, Эллис-121 NO_3 , Элит-071 NO_2 (табл. 3.3).

Таблица 3.3 - Диапазоны измерения содержания ионов.

Определяемый ион	Диапазон измерения, моль/л
Хлорид	$3 \times 10^{-5} \dots 10^{-1}$
Фторид	$10^{-5} \dots 10^{-1}$
Нитрат	$5 \times 10^{-5} \dots 5 \times 10^{-1}$
Нитрит	$10^{-5} \dots 10^{-1}$

В некоторых случаях, когда содержание хлоридов в растворах превышало верхний предел обнаружения ионоселективным электродом (а именно, в котлах Донного поля), хлорид-ион определялся в лабораторных условиях объемным аргентометрическим методом с роданидом калия или аммония по методике [Резников и др., 1970] в ИВиС ДВО РАН, аналитик С.И. Сергеева.

Для лабораторного анализа в процессе отбора пробы воды фильтровались через мембранный фильтр 0.45 μm , при транспортировке хранились в пластиковых контейнерах.

Таблица 3.4 - Характеристики термометра ЛТ-300.

Диапазон измеряемых температур, °С	от -50 до +300	
Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры, °С	- в диапазоне измерения от -50.00 до +199.99 °С	- в диапазоне измерения от +200.0 до +300.0 °С
	±0.05	±0.2
Цена единицы младшего разряда измеряемой температуры, °С	- в диапазоне измерения от -50.00 до +199.99 °С	- в диапазоне измерения от +200.0 до +300.0 °С
	0.01	0.1
Время установления рабочего режима после включения, не более, с	5	

Также были отобраны пробы для отжима поровых вод:

- влажное вещество сильно переработанных вмещающих пород на термальных площадках термальных полей;
- донные осадки всех водоемов.

Пробы сразу же помещались в пластиковые герметичные пакеты, а затем в лабораторных условиях из них прессом (давление 100 атм.) была отдавлена жидкая фаза [Бортникова и др., 2009]. Отжимом проб и замером некоторых параметров в лаборатории, а конкретно все работы на приборах НАСН и Эксперт – 001 занимался автор лично. Воспроизводимость результатов проверена трёхкратным замером.

Содержание закисной формы железа (Fe^{2+}) определялось на месте прибором **HACH DR/800**. Поскольку верхний предел обнаружения - 3 мг/л, то пробы разбавлялись в несколько раз.

Характеристика прибора согласно инструкции, гласит: «Колориметр DR/800 был специально создан для бесперебойной работы в полевых и даже во вредных условиях. Он сочетает простоту с совершенными техническими характеристиками, поставляется с запрограммированными в памяти методиками, в прочных водо- и пыленепроницаемых, химически устойчивых корпусах. Вначале задаётся программа, автоматически выбирается длина волны, и далее шаг за шагом на дисплее появляются указания по проведению анализа. Благодаря готовым реагентам HACH выполнение большинства анализов занимает несколько минут (таблица 3.5).

Таблица 3.5 - Характеристики колориметра HACH DR/800 [HACH DR/800 Инструкция к прибору]

Используемые длины волн, нм	Модель DR/890 420, 520, 560, 610
Точность длины волны	± 1 нм
Выбор длины волны	Автоматический, зависит от используемого метода
Источник излучения	Светодиод (ы)
Детектор	Кремниевый фотодиод(ы)
Фотометрический диапазон	0 .. 2 А
Фотометрическая погрешность	линейность ± 0.002 А (0 .. 1 А), Воспроизводимость ± 0.005 А (при 1А).

- Результаты отражаются на дисплее немедленно. Дисплей выдает результаты в единицах концентрации, поглощения и процентах поглощения, одновременно отражаются единицы измерения и измеряемый параметр.

- Во многих методах результаты можно получать в расчете на различные химические формы. Например, при анализе фосфора - в виде P, PO₄ и P₂O₅.
- Программное обеспечение дает возможность проводить коррекцию фона по бланковому раствору реагента и тонкую корректировку калибровочной кривой» [НАСН DR/800 Инструкция к прибору].

Погрешности воспроизводимости и сходимости не превышают заявленных в паспортных данных прибора.

3.3 Аналитические лабораторные методы

Концентрация сульфат-ионов в водных растворах измерялась по стандартной фотометрической методике [РД 52.24.405-95].

Содержание микроэлементов в водных пробах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС, аналитики Трофимова Л.Б, Юркевич Н.В. и Нечепуренко С.Ф.) в аналитическом центре ИГМ СО РАН на приборе **IRIS Advantage** производства фирмы Thermo Jarell Ash Corporation, США [Абросимова, 2013].

Метод ИСП-АЭС основан на измерении интенсивности излучения атомов определяемых элементов, возникающего при распылении анализируемой пробы в аргоновую плазму, индуктивно возбуждаемую радиочастотным электромагнитным полем. Интенсивность спектральных линий при характеристических для каждого элемента длинах волн регистрируется фоточувствительным устройством, измеряется и обрабатывается компьютерной системой [ГОСТ Р 51309-99].

Совокупность примененных методов (геохимическое полевое опробование, привлечение современных аналитических методик, геофизическое зондирование) позволило получить результаты, которые отражают не только состав изучаемых объектов, но и их внутреннюю структуру, и на этой основе сделать основные выводы.

3.4 Обнаружение количественных связей

В качестве петрофизической модели, связывающей пористость, водонасыщенность, солёность вмещаемой породами жидкости, учёными

используется формула Дахнова-Арчи, описывающая электропроводность гетерогенных сред [Нестерова и др., 2009]. Однако, для описания флюидонасыщенной среды термальных полей она не применима: гидротермально изменённые породы термального поля на поверхности рассыпаются в руках, тогда как на небольшой, до полуметра, глубине – выглядят как глинистые и среднезернистые аргиллитоподобные массивы, далее шурфовать термальные поля невозможно из соображений безопасности и сохранения уникальности природных объектов. Таким образом, достаточно сложно измерить такие параметры как пористость и проницаемость. Более того, среды термальных полей являются потенциально анизотропными, их свойства могут меняться нелинейно.

Соответственно, требуется инструмент для установки количественной связи между параметрами среды. Таким инструментом стала формула Муанфара [Moinfar et al., 2010], связывающая минерализацию, температуру и удельное электрическое сопротивление. Однако, и она работает не во всех условиях.

Минерализация – это сумма всех растворённых элементов в литре раствора, измеряемая в г/л, или в мг/л. Данный параметр описывает раствор, как слабо-, средне- и высоконасыщенный. В термальных источниках минерализация колеблется от минимальной до почти рассола. Это связано с изоляцией/доступностью источника, наличием/отсутствием подтока метеорных вод, количеством осадков год от года. Второй параметр – температура – также разница. При наличии значительного подтока грунтовых вод (например, вблизи озера/снежника) – температура источника, замеряемая на поверхности, не отвечает его реальным условиям излияния, и может показывать вполне нейтральную температуру воздуха на поверхности – не более 20 градусов Цельсия. Из этих двух параметров рассчитывается УЭС среды

$$\sigma_w = \left[\left(0.0123 + \frac{3647.5}{C_w^{0.955}} \right) \times \frac{81.77}{T+6.77} \right]^{-1}, \text{ где}$$

C_w – концентрация соли NaCl в ppm;

T – температура в градусах по Фаренгейту;

σ_w - электропроводность пластовой воды, См/м

В работе приведены расчёты по вышеприведённой формуле для выведения количественной связи между геофизическими и геохимическими параметрами среды термальных полей.

3.5 Полевые исследования в кальдере вулкана Узон

Схема работ на термальном поле кальдеры Узон приведена на рисунке 3.6. Выполнено 2 профиля электротомографии длиной 48 метров с межэлектродным расстоянием 1 метр и над ними - 14 параллельных профилей частотного зондирования той же длины с расстоянием между профилями 1 метр. При этом, площадка ЧЗ проходит непосредственно по профилям ЭТ. Этот объект интересен обилием термальных источников, находящихся на небольшой площадке.

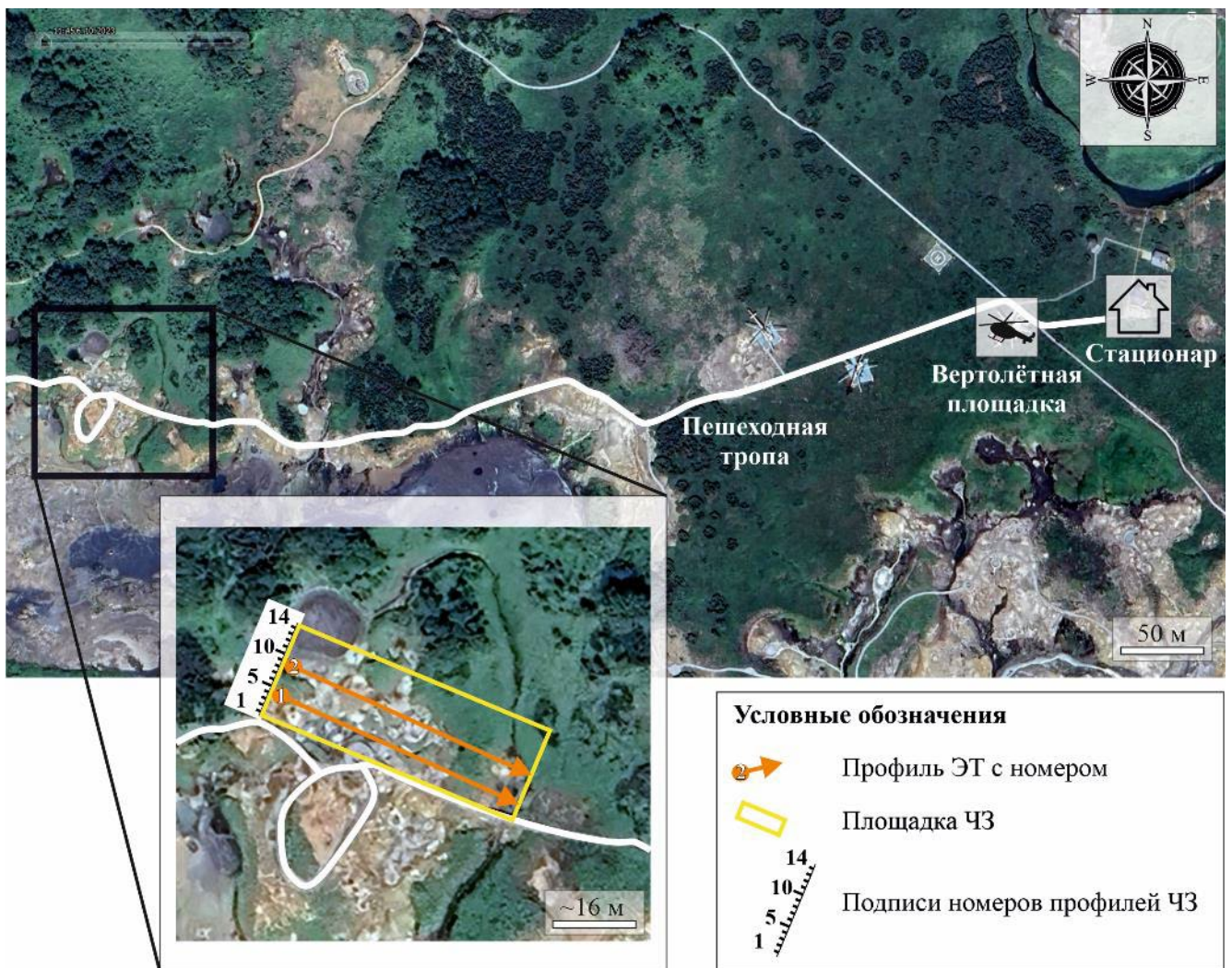


Рисунок 3.6 - Расположение профилей электротомографии (выделены оранжевым) и площадки исследований методом частотного зондирования

(жёлтым) на термальном поле кальдеры вулкана Узон на космоснимке в приближении с высоты 600 м

С северной стороны тропы (рис. 3.5) находится большая часть термопроявлений (котлы №№ 1-8), с южной стороны тропы находятся четыре котла (пробы №№ 9-12), и они также могут вносить свои изменения в подповерхностное пространство.

3.6 Полевые исследования в кальдере Академии Наук

Тем же прибором были выполнены исследования в кальдере Академии Наук. На рисунке 3.7 представлена схема расположения профиля электротомографии на источниках Академии наук.

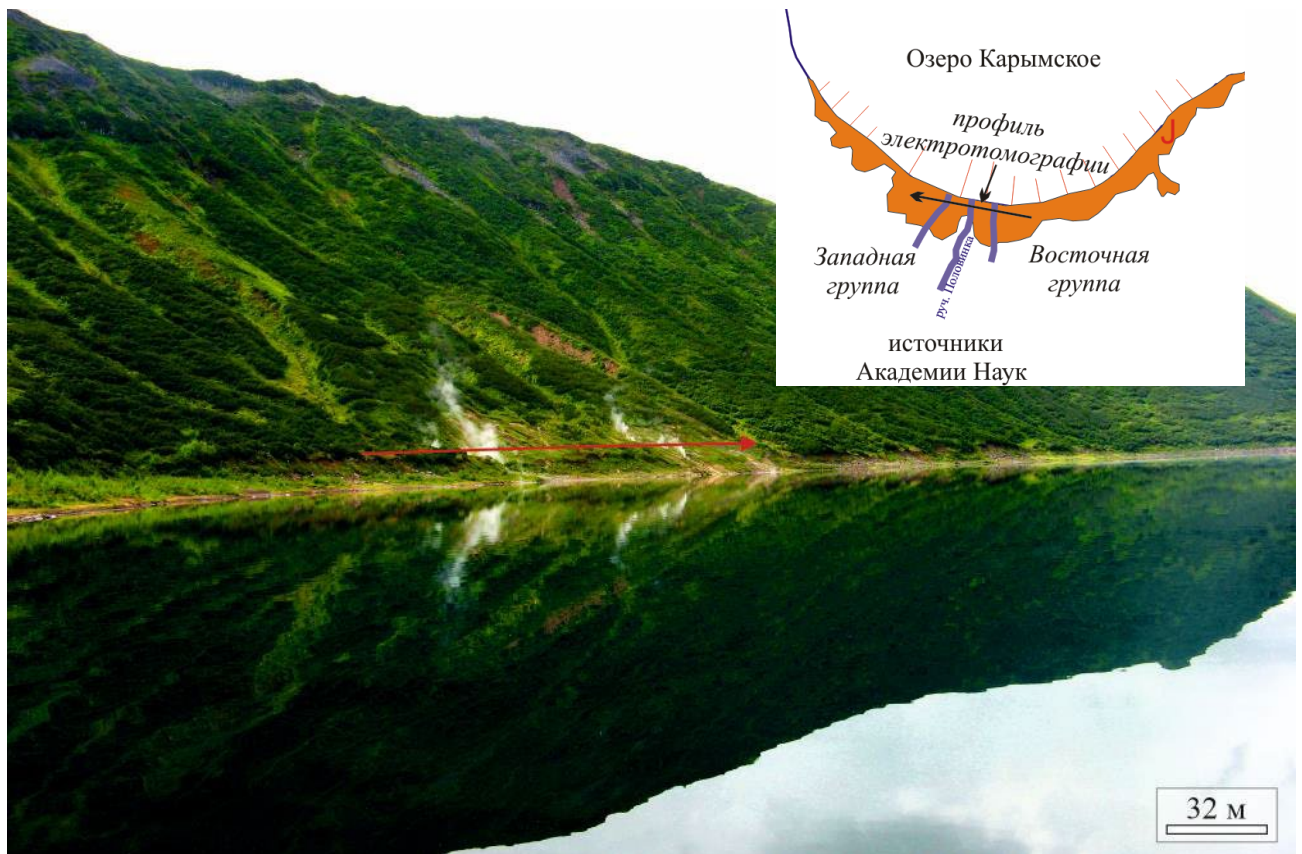


Рисунок 3.7 - Расположение профиля электротомографии на источниках Академии наук на схеме и на фотографии

На противоположном берегу озера Карымского были выполнены следующие работы (рис. 3.8):

- 18 профилей ЭТ непосредственно на акватории озера Карымского, над кратером Токарева;

- профиль ЭТ вдоль ручья Горячего;
- несколько профилей ЧЗ вкрест профиля ЭТ и ручья Горячего.

Оранжевой линией вдоль ручья горячего на рисунке 3.7 отмечен профиль ЭТ. Горячие источники, опробованные вдоль ручья Горячего, были зафиксированы несколькими поперечными ручью и профилю электротомографии профилями частотного зондирования. Таким образом, можно оценить общий фон УЭС и частные приповерхностные изменения.

В кратере Токарева, образовавшего полуостров Новогодный, в августе 2008 года были проведены электроразведочные работы непосредственно на акватории (рис. 3.8-3.10). Целью исследования являлось изучение геоморфологии формирования современного вулканического кратера на основе геофизических данных и геологического полевого изучения пород. Было проведено картирование дна кратера для определения его строения и обнаружения возможных источников вулканических эманацій [Грахова и др., 2020].

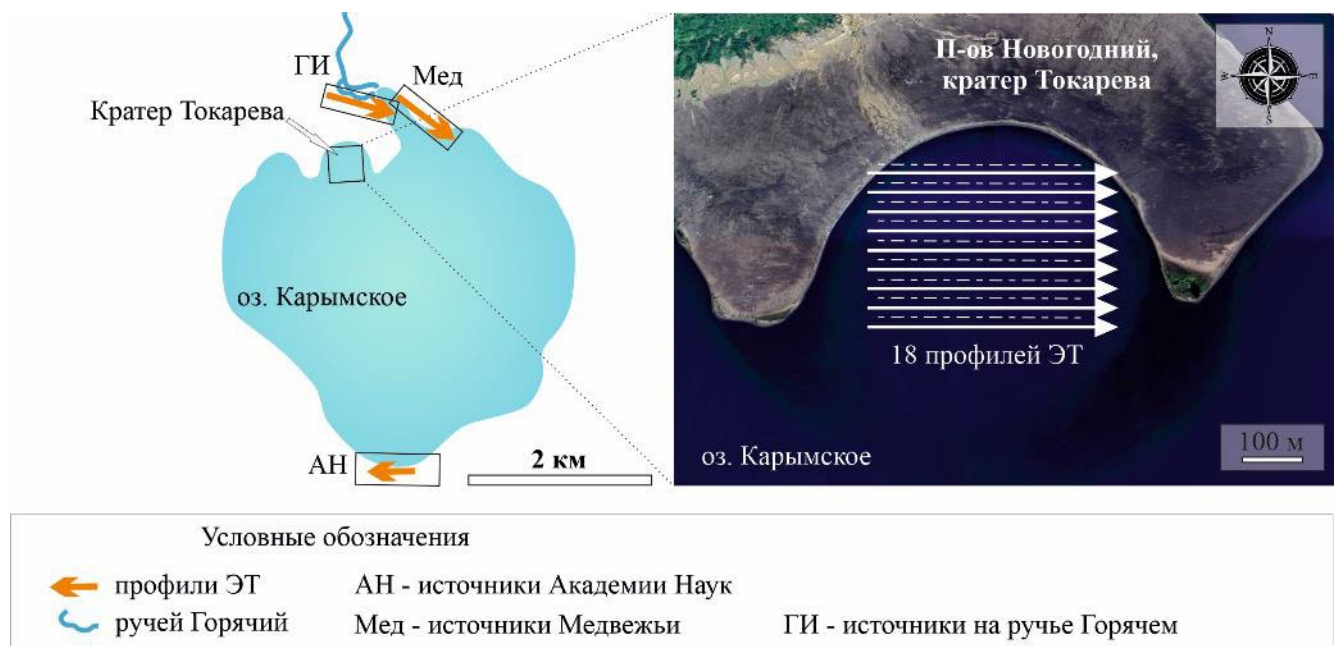


Рисунок 3.8 - Карта-схема участка работ кальдере Академии Наук, справа - схема расположения профилей над кратером Токарева

Непосредственно на объекте исследования была изготовлена плавающая установка для многоэлектродного зондирования методом постоянного тока. Через

каждые 2 метра на кабелях были закреплены поплавки. Оператор с измерительной аппаратурой располагались в катамаране в кратере Токарева, заполненном водой оз. Карымское (рис. 3.9). Расстояние между электродами было выбрано исходя из необходимой глубины зондирования и возможностей прибора, и составило 5 м, таким образом, длина установки – 235 м. Зондирования выполнялись симметричной установкой Веннера. Установка Веннера характеризуется высоким уровнем сигнала, хорошей чувствительностью к горизонтальным границам, плохой чувствительностью к вертикальным границам, средней эффективной глубиной и малым горизонтальным покрытием, изучаемой области [Loke, 2004]. Общая глубина зондирования составила не более 50 метров.



Рисунок 3.9 - Плавающая установка электротомографии на акватории,
в лодке – Г.Л. Панин, фото С.Б. Бортниковой

Установка Веннера была выбрана не случайно. Поль-дипольная установка как наиболее глубинная, затруднена выносом электрода на условную бесконечность, что в условиях плотно заросшей кустарником кальдеры было невозможно [Панин и др., 2010]. Также установка Веннера наиболее оптимально описывает разрез, минимально используя заряд батареи, что немаловажно для выполнения восемнадцати профилей за один световой день.

Для усиления установки каждый кабель был закреплён на восьмимиллиметровом фале, что снимало нагрузку с разъемов аппаратуры и самих кабелей. Фалы крепились непосредственно к катамарану. Схематически установка показана на рисунке 3.10. За 8 часов работы было выполнено 18 профилей с шагом 20 метров, центр и концы установки привязывались по GPS.

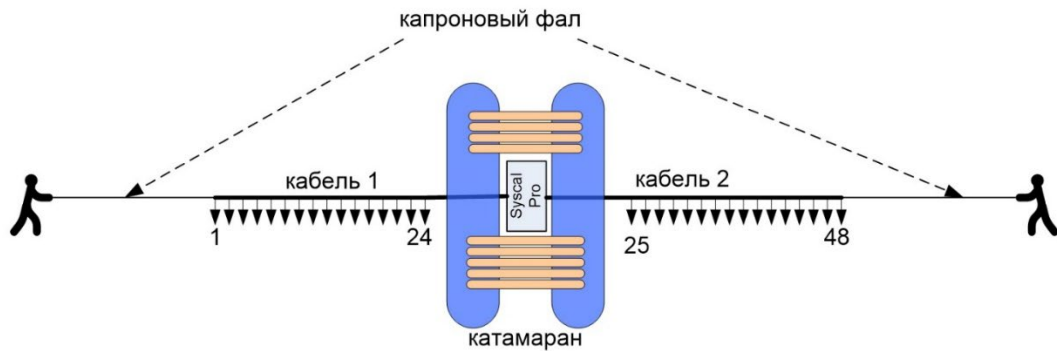


Рисунок 3.10 - Схема электроразведочной установки для работы на акватории

Всего выполнено 18 профилей электротомографии. Первичная обработка данных электротомографии происходит в ПО SibER Tools (ООО «КБ Электрометрии»): детальное рассмотрение кривых ВЭЗ, базовая фильтрация данных, исключение «вылетов» точек. Далее данные экспортируются в формат *.dat, подходящий для большинства ПО, выполняющих инверсию данных. Для итоговой обработки и инверсии полученных данных автор использовал ПО Res2DInv для двумерных исследований, и Res3DInv (Geotomo Corp., Малайзия) для трёхмерных исследований. Дальнейшая визуализация выполняется с помощью ПО Surfer для двумерных и Voxler для трёхмерных исследований производства компании Golden Software. С помощью программы визуализации можно выделить интересующие изоповерхности по значению УЭС. В случае с кратером Токарева были выбраны значения 55, 80 и 98 Ом·м.

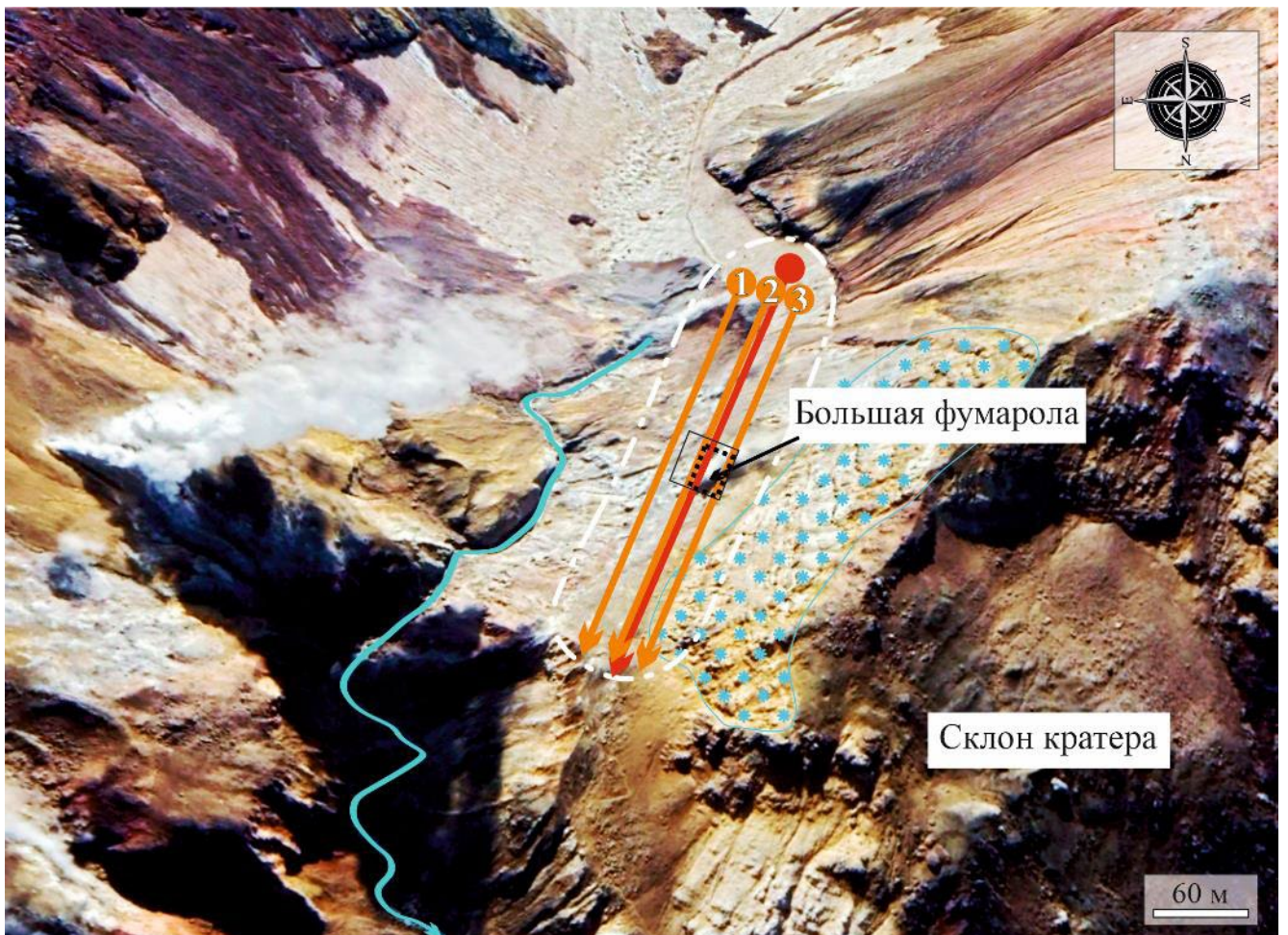
3.7 Полевые исследования на Мутновском вулкане

В течение нескольких полевых сезонов на Донном термальном поле Мутновского вулкана был выполнен ряд геофизических работ: двух- и трёхмерные исследования методами электротомографии и частотного зондирования:

- 2009 год: 1 профиль ЭТ, 16 профилей ЧЗ;

- 2013 год: 1 профиль ЭТ, расположенный квадратом – для получения пирамиды данных;
- 2020 год: 3 профиля ЭТ;

В 2009 году через всё Донное термальное поле был заложен профиль электротомографии, расположившись серединой расстановки непосредственно у Большого котла (рис. 3.11). Некоторые термальные котлы имеют своё название в связи с тем, что остаются год от года на своих местах. Чаще это большие источники, имеющие стационарный и достаточно объёмный подводящий канал.










Условные обозначения			
	границы Донного термального поля		Профиль ЭТ 2009 года
	река Вулканная		Площадка ЧЗ 2009 года
	Снежник		Площадка 3D ЭТ 2013 года
			Профиль ЭТ 2020 года с номером

Рисунок 3.11 - Схема исследований на Донном термальном поле Мутновского вулкана

3.8 Полевые исследования на вулкане Эбеко

В июле 2021 года на юго-западном термальном поле вулкана Эбеко были заложены два профиля микротомографии. Сопротивления заземления <0.1 кОм, зондирования выполнены расстановками «Шлюмберже» и диполь-диполь. При дальнейшей обработке, несмотря на качественное оборудование и хорошее заземление, данные зондирования расстановкой диполь-диполь были отбракованы из-за большого количества «выбросов» на кривых зондирования. Таким образом, в работе представлен только профиль зондирования расстановкой Шюмберже.

Профиль был заложен на термальном поле, центром расстановки стала крупная фумарола (рис. 3.12).

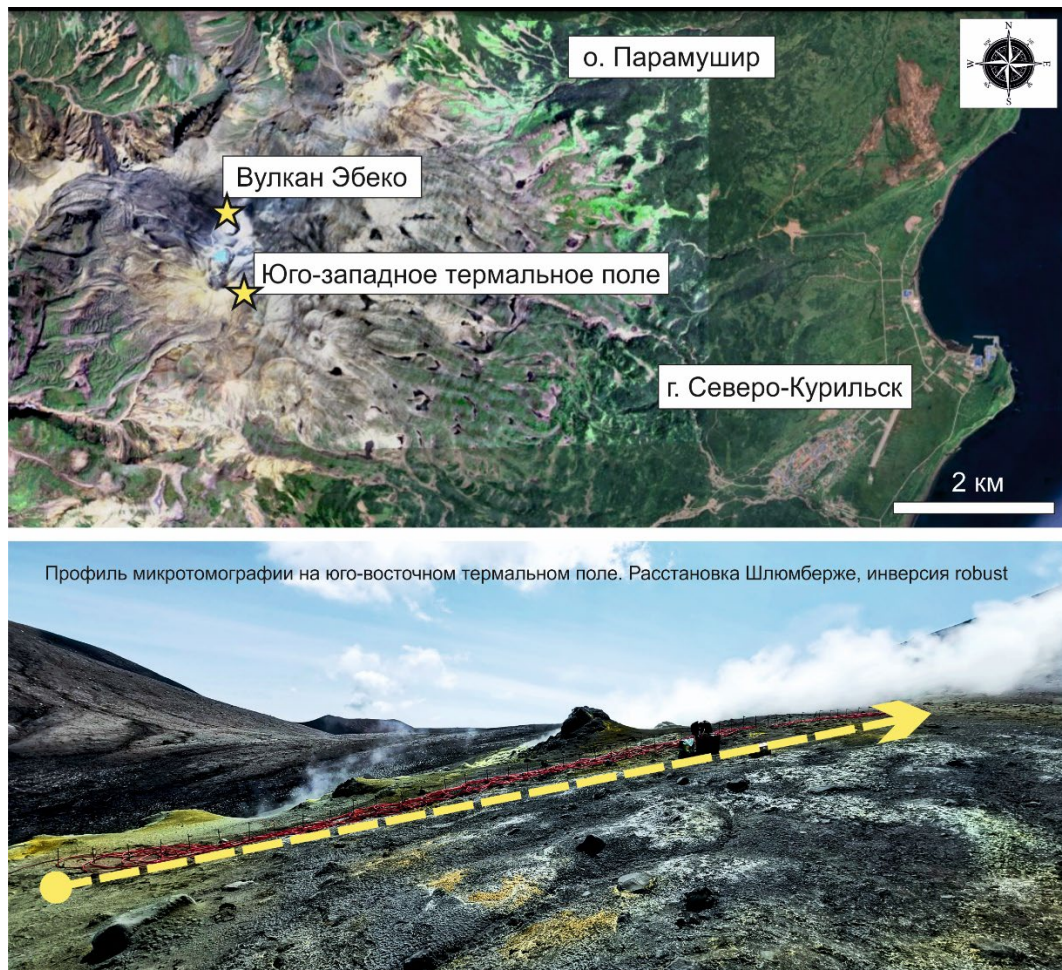


Рисунок 3.12 - Схема исследований в кратере вулкана Эбеко. Сверху - место исследования на космоснимке сервиса Google Earth от 08.2024 г. в приближении с высоты 14 км. На фотографии автора – расстановка микротомографии с отмеченным началом и концом, ориентирована с юга на север

Межэлектродное расстояние – 0.3 м, эффективная глубина исследования – 2.5 м. С помощью данного исследования устанавливается верификация детализация самой верхней части разреза, а именно становится возможным сопоставление результатов частотного индукционного зондирования и электротомографии – уменьшение шага микротомографии даёт детальность, позволяющую связать эти два метода, поскольку разрушающие методы контроля в виде, например, шурфа – исключены на подобных природных объектах.

3.9 Выводы

Высокая достоверность полученных результатов интерпретации электроразведочных данных с учётом геохимических исследований подтверждается качественными полевыми данными (сертифицированные приборы, имеющие актуальные свидетельства поверки, качественное заземление электродов при выполнении зондирований методом электротомографии, точная географическая привязка профилей, тщательное описание отобранного материала), минимальными ошибками при обработке данных (современное программное обеспечение, широко применяемое в Российской Федерации и за рубежом, фильтрация и аналитика данных, исключение «вылетов» и некачественных точек зондирования), и квалифицированной работой высококвалифицированных сотрудников Аналитического центра ИГМ СО РАН (геохимические исследования методом ICP-AES). Приведённые методы исследования и соответствующие им приборы не раз применялись на термальных полях активных вулканов. Однако, уникальным является именно комплекс работ, реализованный с помощью приборов и методов. Для каждого из объектов, согласно рекогносцировке, выбран набор, который дал действительно новые результаты.

Глава 4. Анализ результатов исследований

4.1 Кальдера Узон

В 2008 году в кальдере вулкана Узон были выполнены детальные исследования: комплекс геофизических работ, включающий в себя частотное зондирование, электротомографию (в том числе и для получения трёхмерного изображения); геохимическое опробование.

4.1.1 Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Детальное геохимическое опробование производилось на разнообразных термопроявлениях, в основном – котлах. Для исследований отбиралось кипящее вещество котлов, а также материалы их стенок, с помощью пресса из которых отжаты поровые растворы.

Растворы котлов кислые, уровень pH колеблется от 2.2 до 4.3, Eh варьирует от слабо- до сильно-окислительных условий. Воды сульфатного и сульфатно-хлоридного типа. Состав растворов куда более стабильный, чем на термальных полях Мутновского вулкана и Кальдеры Академии Наук.

Общая минерализация растворов сравнительно невысока: от 0.37 до 2 г/л (рис. 4.1), компонент, составляющий наибольшее содержание – SiO_2 . Концентрации микроэлементов в растворах котлов также изменяются в небольших пределах. Их доля в общей минерализации колеблется от 0.07 до 2.4 %. Однако поровые воды котлов обнаруживают совершенно иной состав – гораздо более высокую минерализацию, складывающуюся, главным образом, в анионном составе из сульфатов (на порядок более высокие концентрации этого компонента в поровых водах, чем в свободных растворах) [Бортникова и др., 2013].

Сопоставляя уровень минерализация с УЭС растворов по данным частотного зондирования, становится очевидна обратнопропорциональная зависимость: при росте минерализации закономерно снижается сопротивление (рис. 4.2). Однако, стоит ещё раз отметить высокую проводимость среды в целом – значения УЭС на термальном поле не поднимаются выше 40 Ом·м.

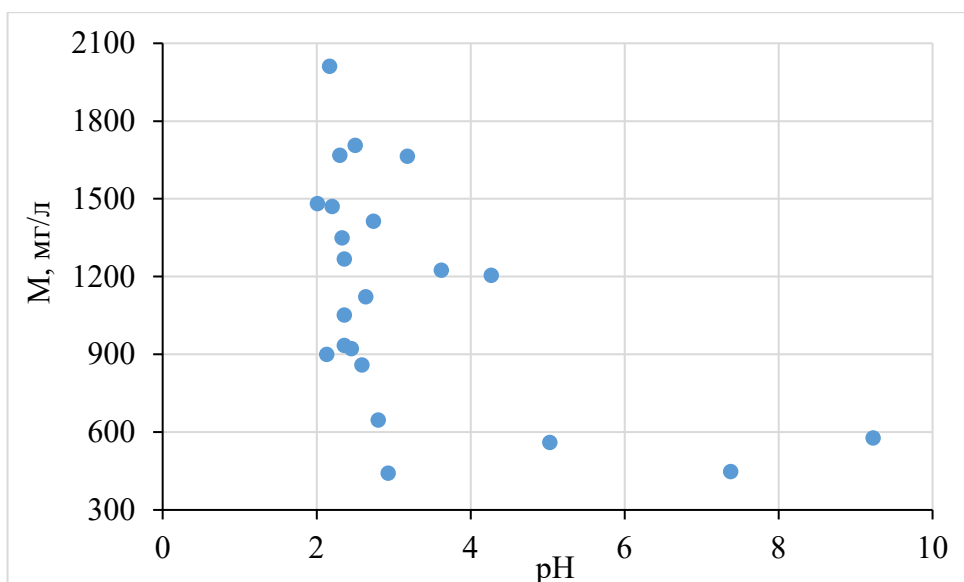


Рисунок 4.1 - Кислотно-щелочные условия в сопоставлении с уровнем минерализации источников термальной площадки кальдеры вулкана Узон

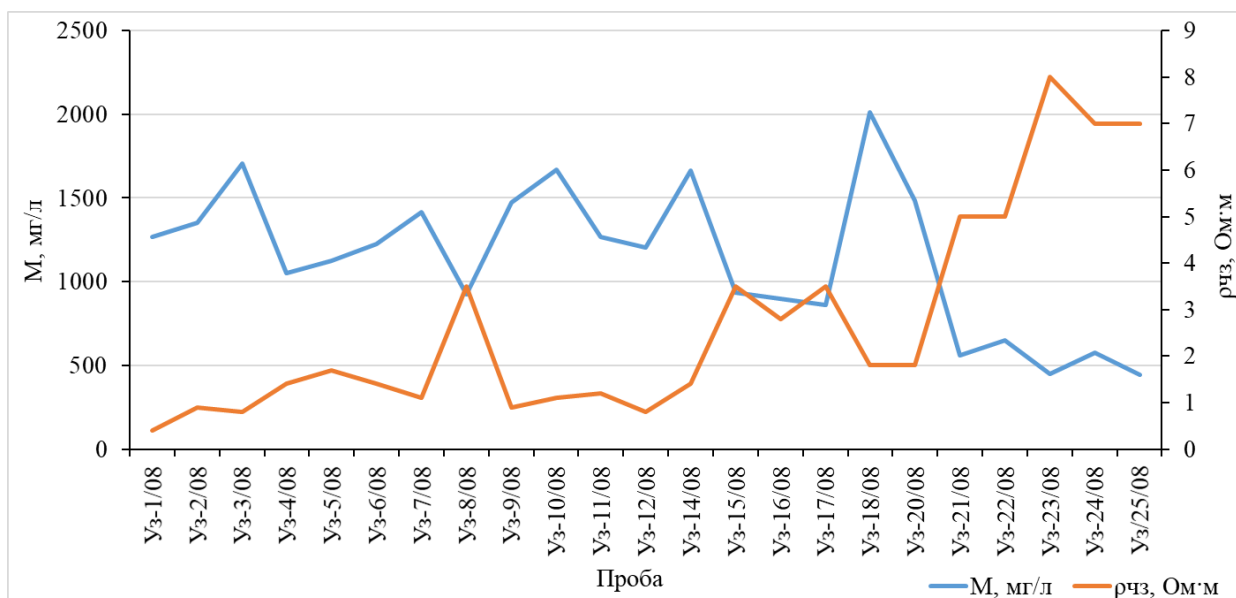


Рисунок 4.2 - Минерализация в сопоставлении с УЭС термальных источников кальдеры вулкана Узон по данным частотного зондирования

4.1.2 Результаты геофизических исследований

На термальном поле в кальдере вулкана Узон результаты зондирования разными методами вполне сопоставимы и дополняют друг друга (рис. 4.3). Все разрезы приведены к единой шкале, являются высокопроводимыми (УЭС не более 100 Ом·м). На профиле ЭТ №1 видны выходы терм к поверхности, соединяющиеся друг с другом на глубине 2 м, и имеющие общее низкоомное (0.1-4 Ом·м) основание. Соответствующий ему профиль частотного зондирования № 2 едва

достигает 30 Ом·м. Начинаются профили с площадки повышенного сопротивления – в том месте находятся небольшие парящие грязевые вулканы. Скорее всего повышение сопротивления связано с низкой обводнённостью вулканов, насыщением поверхности газом. Далее находится котёл № 7, нашедший отображение на профиле ЭТ, и визуально отсутствующий на профиле ЧЗ. Это может быть связано с разной разрешающей способностью методов.

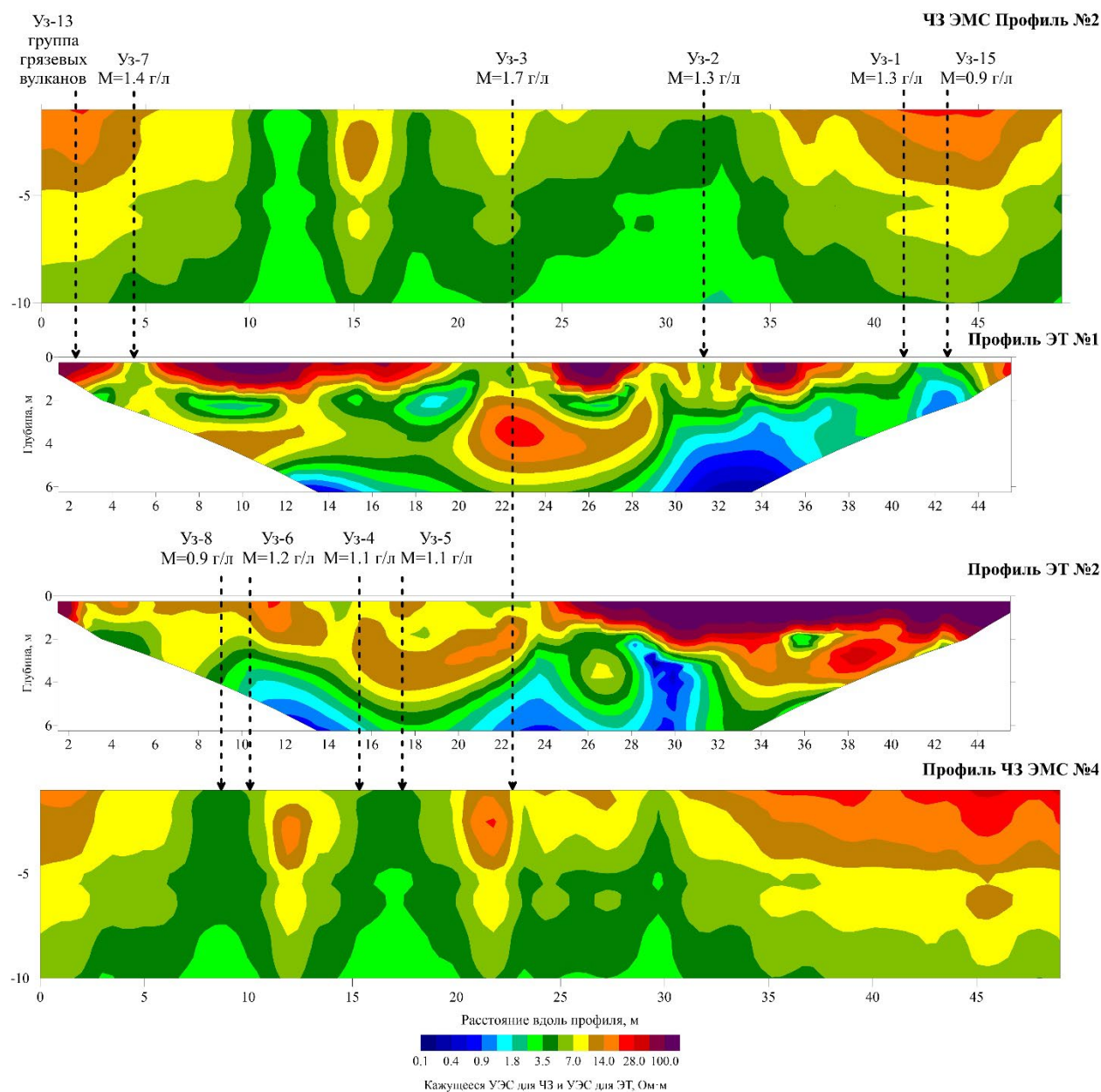


Рисунок 4.3 - Профили ЭТ и ЧЗ на термальном поле кальдеры вулкана Узон

На профиле ЭТ № 2 с середины профиля и до конца на поверхности проявлена относительно высокоомная зона (УЭС 100 Ом·м и выше), она же повторяется на профиле частотного зондирования – это связано с окончанием

термальной площадки, далее за профилями течёт небольшой ручей. На втором профиле электротомографии подводящие каналы источников менее заметны, зато на профиле частотного зондирования выделены достаточно.

Результаты совокупной обработки 14 профилей ЧЗ позволили получить трёхмерную визуализацию участка термального поля. На рисунке 4.4 представлена изоома, отвечающая кажущемуся сопротивлению $4.9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

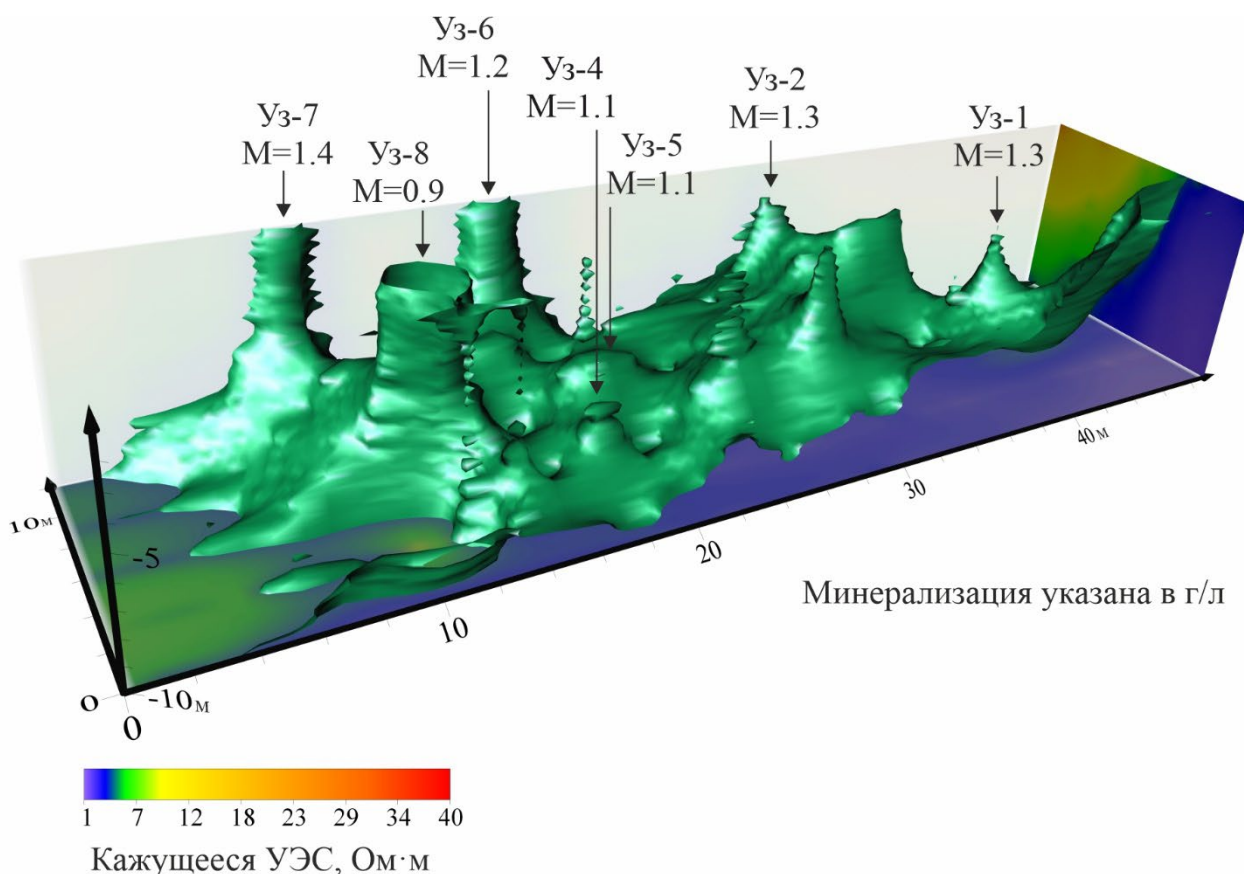


Рисунок 4.4 - Трёхмерная визуализация результатов исследований методом частотного зондирования над грязевыми котлами термальной площадки кальдеры вулкана Узон

Достаточно чётко визуализирована верхняя часть разреза: видны продолговатые структуры непосредственно на местах выхода гидротерм, что свидетельствует о картировании конкретных термальных источников и их подводящих каналов, которые, начиная уже с глубины 5 метров, объединяются.

Все опробованные источники отмечены на трёхмерном изображении, однако подводящих каналов больше – это говорит об очень плотном расположении

термальных источников на небольшой площадке. Подводящие каналы имеют наименьшее сопротивление, вся вмещающая среда – повышенное относительно них.

При сопоставлении данных электротомографии с результатами частотного зондирования подтверждается низкое сопротивление среды, но более детально вырисовывается верхняя часть разреза, последние метры, на которых источники приобретают собственные пути разгрузки, имея возможность местами остыть, местами соединиться с соседним источником, а где-то не найти выхода на поверхность – тогда обнаруживаются купольные приповерхностные структуры, которые особо опасны в изучении, ведь при настолько низких сопротивлениях нельзя уверенно сказать, выдержит ли купол исследователя с прибором, или нет.

4.1.3 Связь геофизических и геохимических параметров среды

Для растворов грязевых котлов термального поля кальдеры вулкана Узон были выполнены расчёты по формуле 3.4, позволяющей связать гидрохимические параметры среды с геофизическими натурными измерениями по эмпирической зависимости.

Таблица 4.1 - Измеренные и оценочные параметры для термальных котлов кальдеры вулкана Узон.

Измеренные и оценочные параметры	Уз-1/08	Уз-2/08	Уз-3/08	Уз-4/08	Уз-5/08	Уз-6/08	Уз-7/08	Уз-8/08
pH		2.33	2.5	2.36	2.64	3.62	2.74	2.45
Eh	442	274	164	350	585	440	255	587
M, г/л	1.3	1.3	1.7	1.1	1.1	1.2	1.4	0.9
M, ppm	1266	1350	1707	1053	1123	1225	1415	923
T, °C	96.7	89.3	66.6	97.7	94	95	96	32.5
T, °F	206	193	152	208	201	203	205	91
σ_w	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.2
$\rho_{расч}$, Ом·м	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8	1.6	1.4	4.5
$\rho_{эт}$, Ом·м	6	6	6	10	12	12	6	10
$\rho_{чз}$, Ом·м	20	6	10	6	4	6	12	4

Продолжение Таблицы 4.1

Измеренные и оценочные параметры	Уз-9/08	Уз-10/08	Уз-11/08	Уз-12/08	Уз-14/08	Уз-15/08	Уз-16/08
pH	2.2	2.3	2.36	4.27	3.18	2.36	2.13
Eh	246	245	238	438		240	496
M, г/л	1.5	1.7	1.3	1.2	1.7	0.9	0.9
M, ppm	1472	1669	1268	1205	1664	935	900
T, °C	85.8	88.7	87.1	99.3		78	82
T, °F	186	192	189	211	32	172	180
σ_w	0.7	0.8	0.6	0.6	0.2	0.4	0.4
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	1.5	1.3	1.7	1.6	6.5	2.4	2.4
$\rho_{ЭТ}, Ом\cdotм$	10	8	10	10	12	8	10
$\rho_{ЧЗ}, Ом\cdotм$	10	8	6	10	8	6	8

Измеренные и оценочные параметры	Уз-17/08	Уз-18/08	Уз-20/08	Уз-21/08	Уз-22/08	Уз-23/08	Уз-24/08	Уз-25/08
pH	2.59	2.17	2.01	5.03	2.8	7.38	9.23	2.93
Eh	487	224	458	260	337	-36	183	218
M, г/л	0.9	2.0	1.5	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4
M, ppm	860	2012	1482	561	647	449	578	442
T, °C	65	68	70	70	70	70	70	92.7
T, °F	149	154	158	158	158	158	158	199
σ_w	0.3	0.8	0.6	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	3.0	1.3	1.7	4.3	3.7	5.3	4.2	4.3

В таблице 4.1 приведены значения трёх вариантов УЭС: оценочного по эмпирической зависимости, измеренного методом электротомографии, измеренного методом частотного зондирования.

Касаемо приведённого в таблице 4.1 УЭС по данным частотного зондирования - корректность трехмерных моделей по данным ЭМС описана в статье Балкова Е.В., где приведено сравнение трансформации сигналов электромагнитного сканера ЭМС в УЭС в виде псевдоразреза и разрез по данным электротомографии, а также проведена одномерная инверсия данных ЭМС: «Результаты сравнительных полевых работ методами МЧЗ и ЭТ показывают, что

трансформация сигналов МЧЗ может давать хорошее приближение реальному двумерному распределению УЭС грунта. Одномерная инверсия данных МЧЗ указывает на локальность использованной аппаратуры ЭМС, обеспечивая разрешения структур, являющихся двумерными для метода ЭТ, с помощью одномерного подхода. Параметры слоистой модели, восстановленной по результатам МЧЗ, достаточно точно коррелируют с результатами двумерной инверсии метода ЭТ. Численные и полевые эксперименты подтверждают работоспособность компактных многочастотных приборов в осуществлении частотного зондирования малых глубин» [Балков, 2011].

Расхождение значений всех трёх УЭС (оценочного и двух измеренных) колеблется в пределах допустимого, поскольку гидротермально изменённые породы и проводящие высокоминерализованные растворы на разрезах ЧЗ и ЭТ незаметно переходят из одного в другое, а пробы вещества берутся точно вдоль профилей зондирования и отражают геохимические параметры растворов самих термальных источников. Поэтому значения оценочных и измеренных УЭС необходимо рассматривать в определённых диапазонах, соответствующих высокопроводящим зонам на профилях (от 0.1 до 25 Ом·м). В таком случае оценочные и измеренные значения сопоставимы.

4.1.4 Выводы

С помощью зондирований методами ЭТ и ЧЗ установлено, что источники на термальной площадке кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов. Также построена геоэлектрическая модель, описывающая зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. С помощью геохимического опробования и последующей аналитики получена общая минерализация растворов и уровень концентрации элементов в жидкой фазе, которые зависят от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода». Оценочное УЭС соизмеримо по значениям с измеренными.

Стоит учитывать, если значения рН в растворах источников стабильны и колеблются в пределах от 8.0 до 9.5, то Eh изменяется в широких пределах: от 37 до 326 mV. Для озера же характерна окислительная обстановка при значительных изменениях рН. Основной объём озера слабокислый – околонеutralный (4.81 – 5.09), повышение рН происходит в водах пляжных зон из-за влияния термальных источников, количество которых существенно увеличилось после субаквального извержения 1996 г. А рН в озере после извержения существенно снизился до 3.22, затем постепенно поднимался до слабокислой-близнейтральной. Однако состав источников Академии Наук изменился незначительно.

Большое разнообразие обнаружилось и в гидрохимическом составе различных групп гидротерм. Условно они делятся на три основные: преимущественно хлоридные, сульфатные и гидрокарбонатные. Следует сказать, что в наиболее глубинных источниках ведущую роль играет хлорид-ион, сульфатные воды формируются в пределах свежеизверженных пород, а гидрокарбонатные воды – это воды поверхностного происхождения, образующиеся при просачивании дождевых и снеговых вод в подземные резервуары.

Аналогично ситуации на грязевых котлах кальдеры вулкана Узон исследования в кальдере Академии Наук показывают обратнопропорциональную зависимость уровня минерализации от УЭС растворов (рис. 4.6), однако в некоторых случаях, когда минерализация падает (проба ГИ-7, ГИ-9 – горячие источники на полуострове Новогоднем), возможны вариации. Минерализация колеблется в меньших пределах, и составляет в среднем 1 г/л. УЭС источников также колеблется в небольших пределах, и составляет не более 80 Ом·м по данным двух методов исследования, что характеризует термальное поле как высокопроводящую среду.

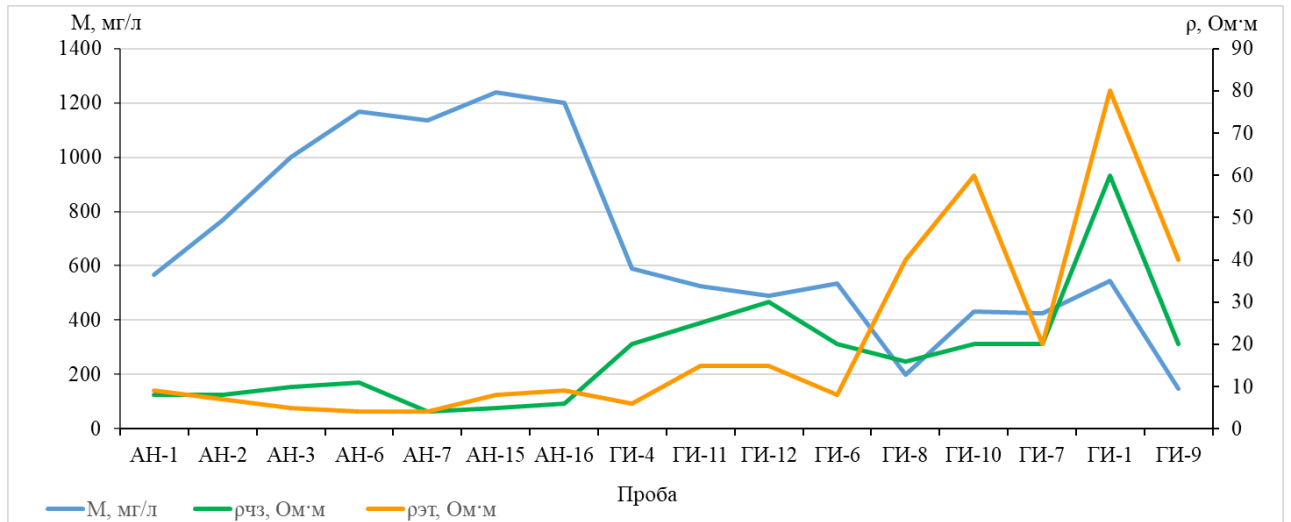


Рисунок 4.6 - Минерализация в сопоставлении с УЭС по данным ЧЗ и ЭТ на термальных источниках кальдеры Академии Наук

4.2.2 Результаты геофизических исследований

Источники Академии Наук

Поскольку условия на склоне кальдеры ограничивают раскладку кос для выполнения электротомографии, то был выполнен профиль длиной 120 метров, с шагом между электродами 5 метров, зондирования производились расстановкой Шлюмберже. Профиль ориентирован с востока на запад, и пересекает большую часть источников (рис. 4.7).

Очевидно, что весь разрез электротомографии представлен преимущественно высокопроводящими породами сопротивлением от 0.1 до 10 Ом·м. Учитывая большое количество источников на поверхности и расположение термальной площадки на берегу озера Карымского, можно предположить, что породы также весьма обводнены. Выделить какие-то конкретные источники или гейзеры не представляется возможным, так как разрез равномерно высокопроводящий. На предельной глубине зондирования сопротивление едва вырастает до 20 Ом·м.

Над профилем ЭТ расположен согласованный по раскладке профиль частотного зондирования, более детально отображающий верхнюю часть разреза. Примечательно, что в данном случае при высокопроводящей среде УЭС и кажущееся УЭС на двух профилях зондирований практически идентичны. На

профиле ЧЗ стрелками отмечены термальные источники (АН-1, АН-2 и т.д.). Очевидно, что они находятся непосредственно на вертикальных аномалиях пониженного сопротивления – таким образом частотное зондирование позволяет увидеть приповерхностные каналы термальных котлов, верхнюю часть выхода на поверхность флюида.

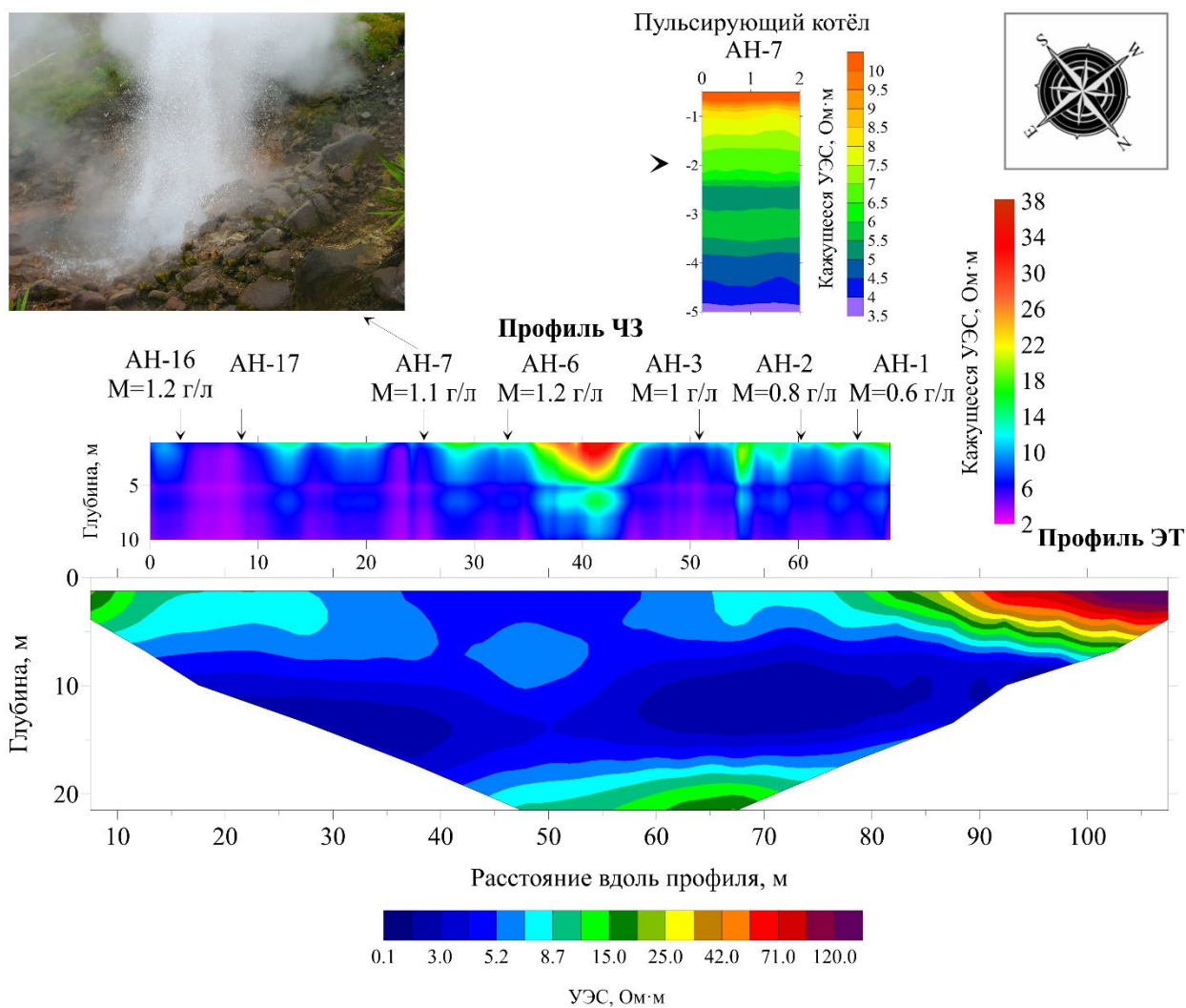


Рисунок 4.7 - Комплекс геофизических исследований на источниках Академии Наук. Сверху – вниз: точечное частотное зондирование над пульсирующим котлом (АН-7), профиль ЧЗ и профиль ЭТ на термальной площадке

Для большого пульсирующего котла (АН-7) представлен отдельный небольшой профиль частотного зондирования длиной 2 метра непосредственно над котлом. Очевидно, что в данном случае канал не усматривается, однако, можно наблюдать повышение кажущегося УЭС от глубины к поверхности. Это связано с тем, что высокоминерализованные воды, находящиеся на поверхности, не могут

сравниться по проводимости с гидротермально изменёнными породами, слагающими стенки котла и его основание. Тем не менее, все зондирования на термальном поле Академии Наук показывают чрезвычайно низкое сопротивление.

Кратер Токарева

Трёхмерная визуализация инверсии массива данных из объединённых 18 профилей электротомографии приведена на рисунке 4.8: последовательно представлены три изоповерхности, каждая из которых соответствует определённому слою. Изоповерхность 55 Ом·м (отмеченная на рисунке 4.8 А) представляет собой поверхность рыхлых отложений на дне кратера, окончание водной толщи, что подтверждено отбором проб со дна озера. Изоповерхность 80 Ом·м на рисунке 4.8 Б соответствует рыхлым вулканогенным отложениям, накопившимся с момента образования кратера. Изоповерхность 98 Ом·м (отмеченная на рисунке 4.8 В) соответствует поверхности коренных пород постройки вулкана.

Безусловно, стоит отметить, что весь геоэлектрический разрез чрезвычайно низкоомный. Подобная привязка изоповерхностей вызвана очевидным подъёмом кратерного дна к его краю (рисунок 4.8 А), где и удалось выполнить привязку по параметрам. Примечательно то, что можно достаточно достоверно проследить не только рельеф кратерного дна, покрытого рыхлыми отложениями, но и поверхность коренных пород, а соответственно, определить величину отложений. В результате построения геоэлектрической модели кратера Токарева на поверхности 80 Ом·м на фоне рыхлых отложений выявлен канал, направленный вертикально вниз, который интерпретирован как флюидопроводник, являющийся поставщиком термальных растворов и газов ко дну озера из нижних горизонтов.

Высокая электропроводность геоэлектрического разреза обусловлена особенностями воды в этом месте озера из-за многочисленных термальных источников, поставляющих высокоминерализованные растворы. Современные отложения по структуре также контрастируют по геоэлектрическим характеристикам с породами основания вулканической постройки, что и позволило создать корректную модель поверхности дна озера.

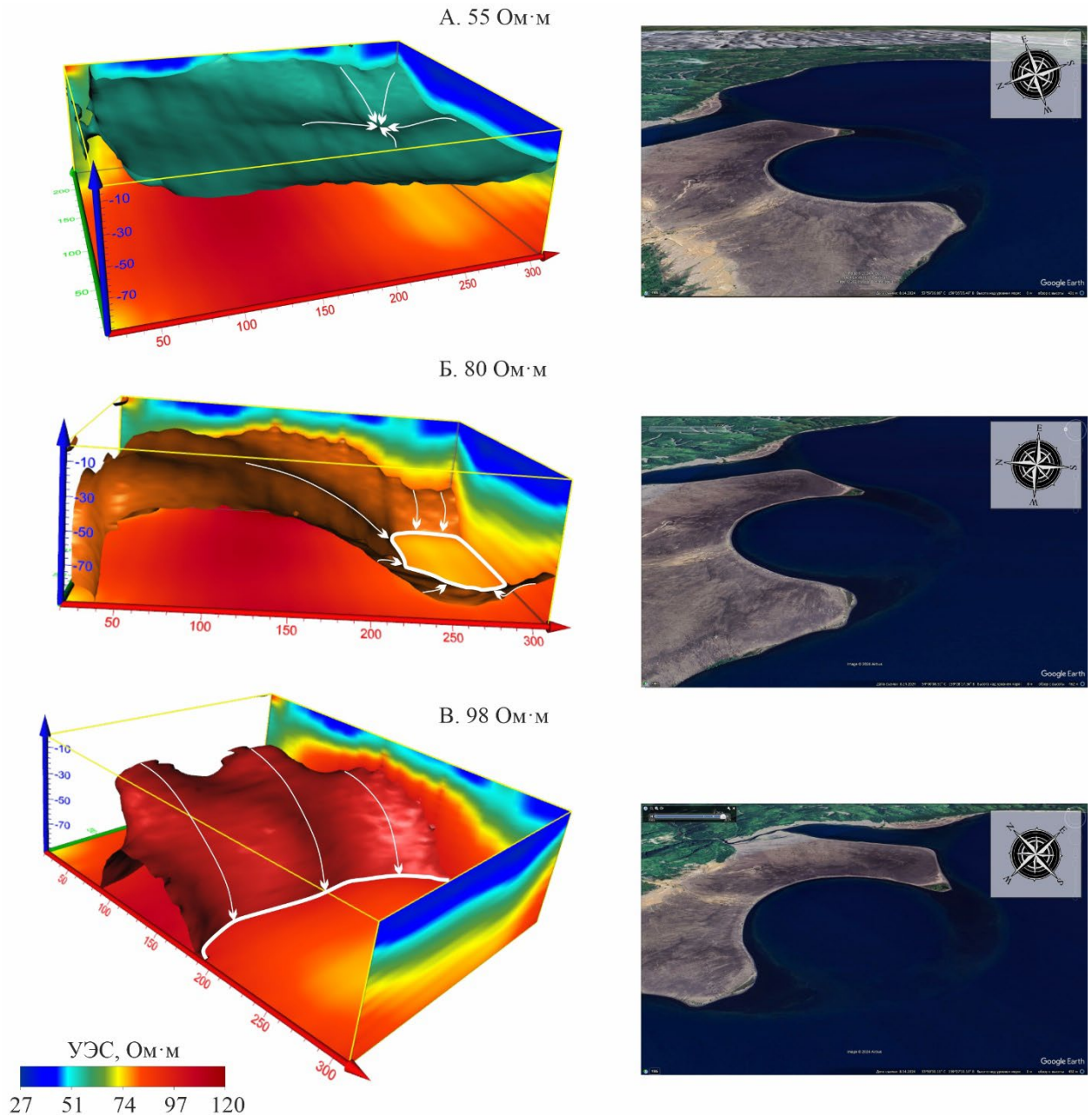


Рисунок 4.8 - Слева: визуализация результатов трёхмерной электротомографии на кратере Токарева: три изоповерхности, соответствующие 55, 80 и 98 Ом·м. Белыми стрелками отмечены ниспадающие борта кратера, белой линией – его очертания по данным ЭТ. Справа – соответствующие по направлению виды на полуостров Новогодний спутниковые снимки в приближении с высоты 480 м

Ручей Горячий, источники Медвежьи

На рисунке 4.9 представлены результаты электротомографии и четыре профиля ЧЗ. Примечательно, что на профиле ЭТ источники соответствуют поверхностным значениям 40-70 Ом·м, в то время как на профилях ЧЗ кажущееся

сопротивление не превышает 20-30 Ом·м, однако подводящие каналы для каждого термального источника хорошо видны с максимальной глубины зондирования 10 метров на профиле ЧЗ.

Своё начало профиль ЭТ берёт у склона кальдеры Академии Наук, проходит с Запада на Восток по берегу ручья Горячего вплоть до озера Карымского. Вдоль профиля слева направо расположены:

- шлако-пепловая равнинка, почва и ручей ещё холодные;
- ГИ-2 температура 22°C, ручей ещё прохладный;
- ГИ-4 температура 45°C, почва также теплеет;
- ГИ-5 температура 54°C;
- ГИ-6 температура 51°C, начинается площадка с небольшими кипящими котлами, горячими выходами, ручей активно парит;
- ГИ-7 – термальная площадка с многочисленными термами и пузырьками;
- ГИ-8 температура 65°C, устье ручья, впадает в речку Карымскую.

Профиль же электротомографии показывает понижение сопротивления дугообразной аномалией величиной порядка 15 метров в высоту на протяжении всего профиля на глубине 20-30 метров. Эта низкоомная (0.1-7 Ом·м) аномалия свидетельствует о нахождении постоянного источника тепла и высокоминерализованных растворов рядом с ручьём Горячим.

Вдоль северного борта кратера вулкана Академии наук немного источников, и все они сосредоточены на небольшой площадке – Медвежьих. Там же собраны небольшие парящие источники, крохотные булькающие котлы, которые детально не опробовались. Описание опробованных источников приведено ниже (рис. 4.10).

- Мед-1 температура 38.6°C, большая ванна, с её дна бьют маленькие горячие источники
- Мед-2 температура 39.8°C, мелкая ванна рядом с Мед-1, на дне бьют мелкие источники.
- Мед-3 температура 50.8°C, тоже ванна.

- Мед-4 температура 12.1°C, холодный ручей, втекающий в ванну Мед-1.
- Мед-5 температура 28°C, озеро у уреза воды в зоне влияния источников.
- Мед-6 – 20 метров восточнее от явных источников.

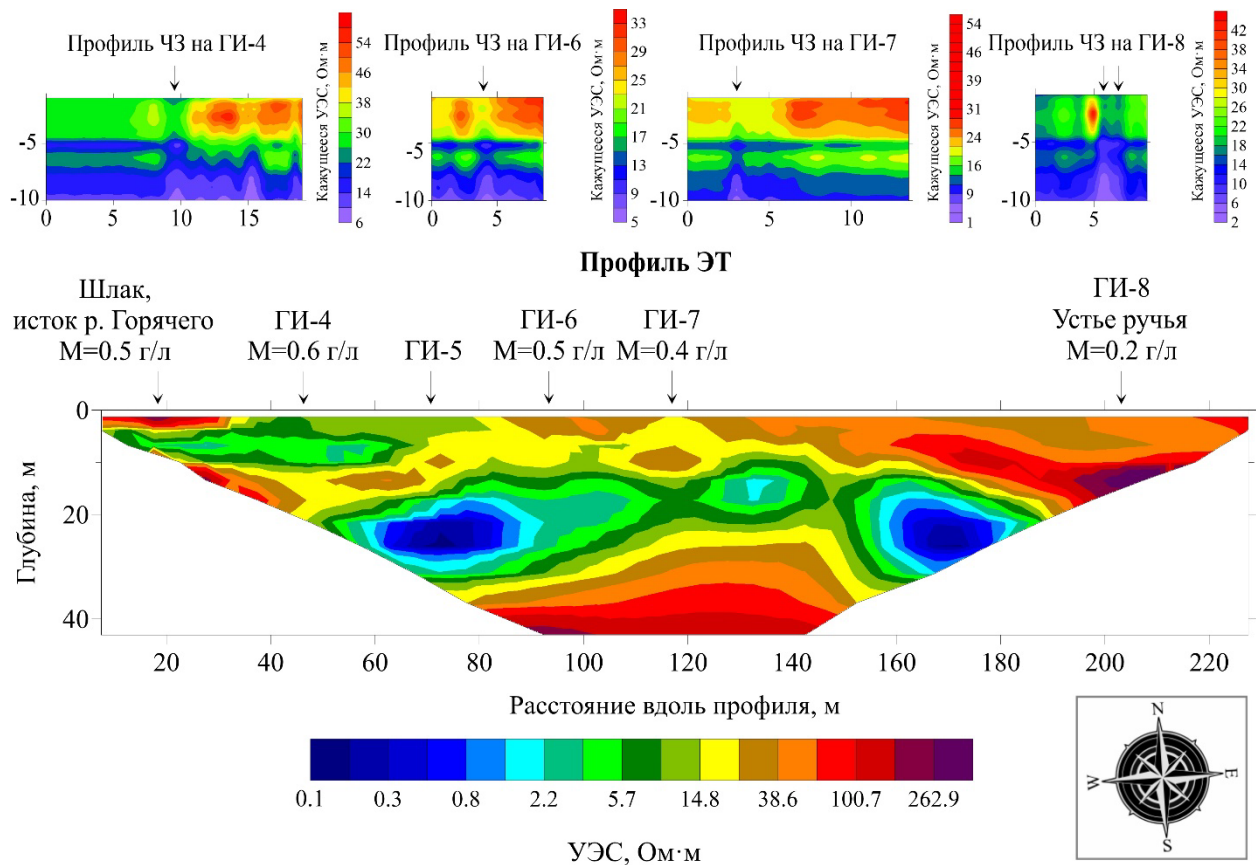


Рисунок 4.9 - Четыре поперечных профиля ЧЗ и один продольный профиль ЭТ на ручье Горячем. Стрелками над профилями ЧЗ отмечены места выходов терм

Пробы Мед-5 и Мед-6 находятся на небольшом удалении от профиля ЭТ, но отмечены на профиле. В контрасте с источниками Академии наук источники Медвежьи обладают куда большим УЭС у поверхности.

На выходах Медвежьих источников разгружаются растворы от нейтральных до щелочных (рН 7.08 – 8.61) и минерализацией ниже, чем в гейзерах Академии Наук (0.34 – 0.57 г/л, рис. 4.5, 4.6), что объясняется смешением с озерными водами. Это и отразилось в геоэлектрических параметрах среды в подповерхностном пространстве (рис. 4.10): УЭС колеблется в районе 30 – 50 Ом·м.

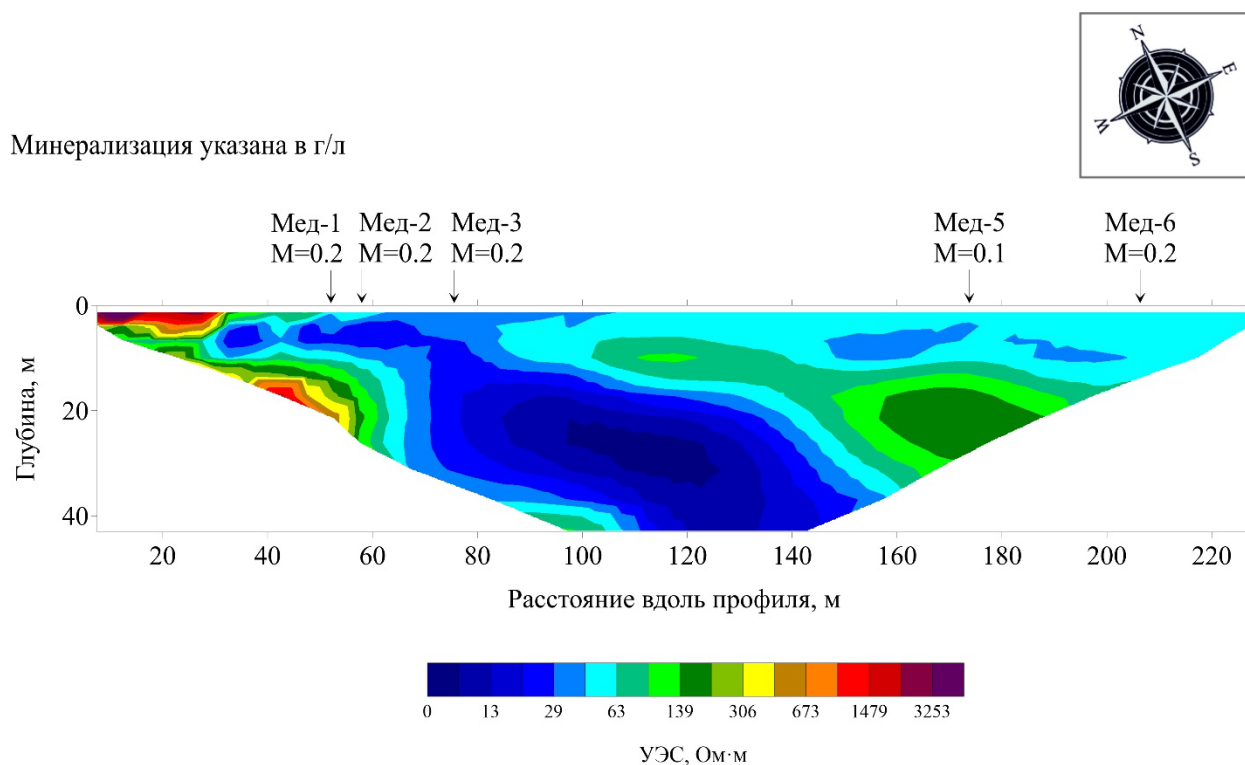


Рисунок 4.10 - Профиль электротомографии по береговой линии на термальных источниках Медвежьих

Однако область с пониженным УЭС (10 – 30 Ом·м) уверенно распространяется вглубь в сторону озера, тяготея корнями к кратеру Токарева. Видимо, тектоническое событие 1996 года и явилось причиной структурных изменений под озером Карымским и появлением канала, питающего вновь образованные источники.

4.2.3 Связь геофизических и геохимических параметров среды

Оценочные значения УЭС для растворов термальных источников кальдеры Академии Наук приближаются к измеренным, аналогично результатам по кальдере влк. Узон и влк. Мутновский (табл. 4.2). Большую роль здесь играет низкий уровень минерализации растворов: чем выше уровень минерализации, тем ниже удельное электрическое сопротивление. Однако при такого рода оценке получаются не столь высокие значения, как по результатам исследований методом ЭТ и ЧЗ. Очевидно, это связано с общей проводимостью среды, менее напитанной высокоминерализованными растворами, чем, например, в кальдере влк. Узон.

Таблица 4.2 - Измеренные и оценочные параметры для термальных котлов кальдеры Академии Наук.

Измеренные и оценочные параметры	Источники Академии Наук						
	АН-1	АН-2	АН-3	АН-6	АН-7	АН-15	АН-16
pH	7.98	8.34	8.37	8.37	8.91	8.6	8.52
Eh	112	64	128	56	-36	140	327
M, г/л	0.6	0.8	1.0	1.2	1.1	1.2	1.2
M, ppm	568	767	1 000	1 169	1 136	1 238	1 200
T, °C	80	80	80	80	80	80	80
T, °F	176	176	176	176	176	176	176
σ_w	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	3.8	2.9	2.2	1.9	2.0	1.8	1.9
$\rho_{эт}, Ом\cdotм$	9	7	5	4	4	8	9
$\rho_{чз}, Ом\cdotм$	8	8	10	11	4	5	6

Измеренные и оценочные параметры	Медвежьи источники						
	КЛ-1	Мед-1	Мед-2	Мед-3	Мед-4	Мед-5	Мед-6
pH	8.27	8.03	8.77	8.01	8.61	7.08	7.86
Eh	-33.9	136.4	-39.8	184	151.9	193.6	165.8
M, г/л	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2
M, ppm	255	224	219	174	66	125	173
T, °C	35.8	38.6	42.8	56.5	9.4	27.8	55.2
T, °F	96	101	109	134	49	82	131
σ_w	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.03	0.1
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	14.5	15.7	15.0	15.4	98.5	33.4	15.8
$\rho_{эт}, Ом\cdotм$	25	25	25	30	40	40	30

Продолжение Таблицы 4.2

Измеренные и оценочные параметры	Полуостров Новогодний			
	ГИ-4	ГИ-11	ГИ-12	ГИ-6
pH	6.45	7.30	6.95	8.33
Eh	132.7	-99.4	-116.1	-170
M, г/л	0.6	0.5	0.5	0.5
M, ppm	591	525	491	534
T, °C	81.2	84.7	79.7	79.7
T, °F	178	184	175	175
σ_w	0.3	0.3	0.2	0.2
$\rho_{расч}$, Ом·м	3.6	3.9	4.4	4.1
$\rho_{эт}$, Ом·м	6	15	15	8
$\rho_{чз}$, Ом·м	20	25	30	20

Измеренные и оценочные параметры	Источники Разломные				Маар
	РАЗ-1	РАЗ-2	РАЗ-3	РАЗ-4	М-1
pH	7.05	7.13	6.02	6.14	9.11
Eh	9.5	-7.5	201.2	187.3	160.4
M, г/л	0.4	0.3	0.2	0.2	0.03
M, ppm	360	338	157	189	27
T, °C	75.7	75	19.5	21.2	15.5
T, °F	168	167	67	70	60
σ_w	0.2	0.2	0.03	0.04	0.01
$\rho_{расч}$, Ом·м	6.2	6.6	32.3	26.0	189.0
$\rho_{чз}$, Ом·м	-	-	-	-	20

Продолжение Таблицы 4.2

Измеренные и оценочные параметры	Ручей Горячий				
	ГИ-8	ГИ-10	ГИ-7	ГИ-1	ГИ-9
pH	9.31	8,04	7.76	6.95	5.97
Eh	188	-3,3	140.1		270
M, г/л	0.2	0.4	0.4	0.5	0.1
M, ppm	200	432	425	545	148
T, °C	14.1	62	66.9	72.1	67.7
T, °F	57	144	152	162	154
σ_w	0.03	0.2	0.2	0.2	0.1
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	29.5	6.0	5.8	4.3	15.8
$\rho_{эт}, Ом\cdotм$	40	60	20	80	40
$\rho_{чз}, Ом\cdotм$	16	20	20	60	20

Если у хорошо минерализованных источников термального поля Академии наук оценочные сопротивления приближаются по значениям к измеренным методами ЭТ и ЧЗ, то на полуострове Новогоднем и Горячем ручье значения отношения сопротивлений выше (табл. 4.2, рис. 4.11). Это связано с тем, что при оценке по эмпирической зависимости описывается взаимодействие минерализации и температуры среды. Однако в реальных условиях окружающие объекты могут давать свою поправку на физические измерения, а конкретно: повышенное сопротивление заземления; вмещающие термальное поле породы контрастируют по уровню УЭС с самой площадкой термального поля; растворы грязевых котлов, термальных источников действительно хуже проводят ток при понижении уровня минерализации.

Значения $\rho_{чз}$ по Разломным и Медвежьим источникам отсутствуют, исследования не проводились. Также отсутствуют значения $\rho_{эт}$ для источников Разломных и Маара.

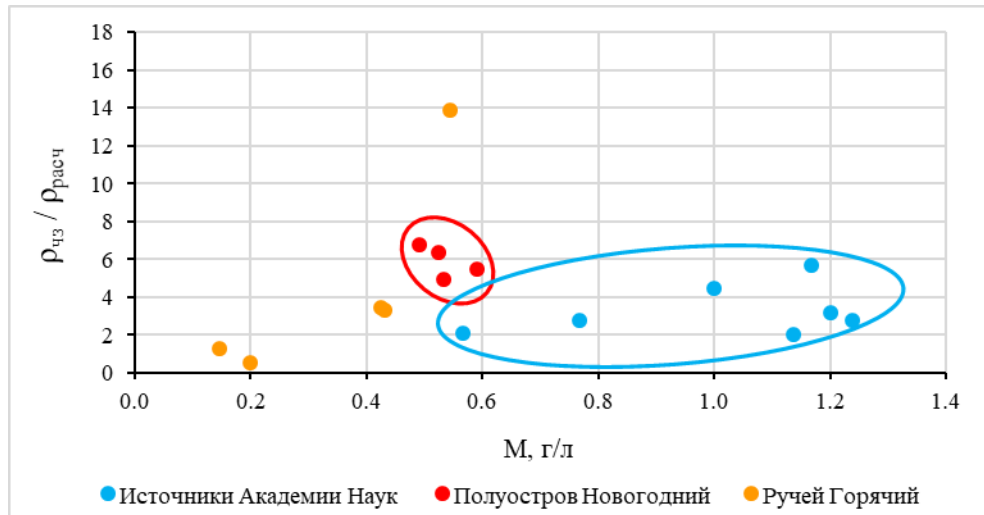


Рисунок 4.11 - Зависимость отношения оценочного УЭС к кажущемуся ЭС по данным ЧЗ от минерализации термальных растворов источников кальдеры Академии Наук

4.2.4 Выводы

С помощью ЭТ впервые эффективно визуализирован кратер Токарева, расстановка на воде оправдала своё использование. По результатам интерпретации данных зондирования установлено, что гейзеры Академии Наук питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на полуострове Новогодний уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева. Оценочное УЭС сопоставимо по значениям с измеренными.

4.3 Вулкан Мутновский

В течение нескольких полевых сезонов на Донном термальном поле в Северо-Восточном кратере Мутновского вулкана было выполнено множество исследований: и электротомография, и частотное зондирование, и геохимическое опробование. Большое количество данных обусловлено хорошей доступностью вулкана – туда можно добраться без вертолётa (в отличие от Карымского вулкана, или кальдеры Узон), а в лучший сезон с плотными снежниками – даже доехать на вахтовке к подножию вулкана.

4.3.1 Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Геохимическое опробование на Донном термальном поле выполнялось несколько лет: в 2006, 2007, 2009 годах, в связи с чем возможно сравнение одних и тех же термальных источников, их расположения, параметров, состава. Геохимические параметры растворов грязевых котлов, их поровых вод удивляют своим разнообразием. Контраст составов, уровней минерализации, рН и Eh наблюдаются у источников, находящихся на расстоянии полуметра друг от друга, они различаются по цвету, прозрачности и температуре (рис. 4.12)

Значения рН большинства котлов лежат в диапазоне 1.95 – 4.20. Окислительно-восстановительный потенциал также показывает разные редокс-условия разгрузок. Какой-либо определенной зависимости между кислотностью растворов и окислительно-восстановительным потенциалом не установлено. В большинстве котлов преобладает сульфат, однако в трех черных котлах хлорид составляет большую долю: 68 – 95 % в анионном составе. В сравнительно небольшом количестве в некоторых котлах обнаружены фосфаты (до 5.2 мг/л) и нитраты (до 6.4 мг/л).

На диаграммах (рис. 4.12, 4.13) параметры растворов котлов, измеренные в 2006 году, резко отличаются от остальных ультра-кислыми условиями (отрицательный уровень рН), так же, с единственным совпадением в измерениях 2007 года. Столь высокая кислотность объясняется маловодными годами, поскольку измерения 2009 года показали повышение уровня рН до значений от 1

до 3 – из-за высокого количества осадков снеготалые и дождевые воды разбавили воды термальных источников Донного поля.

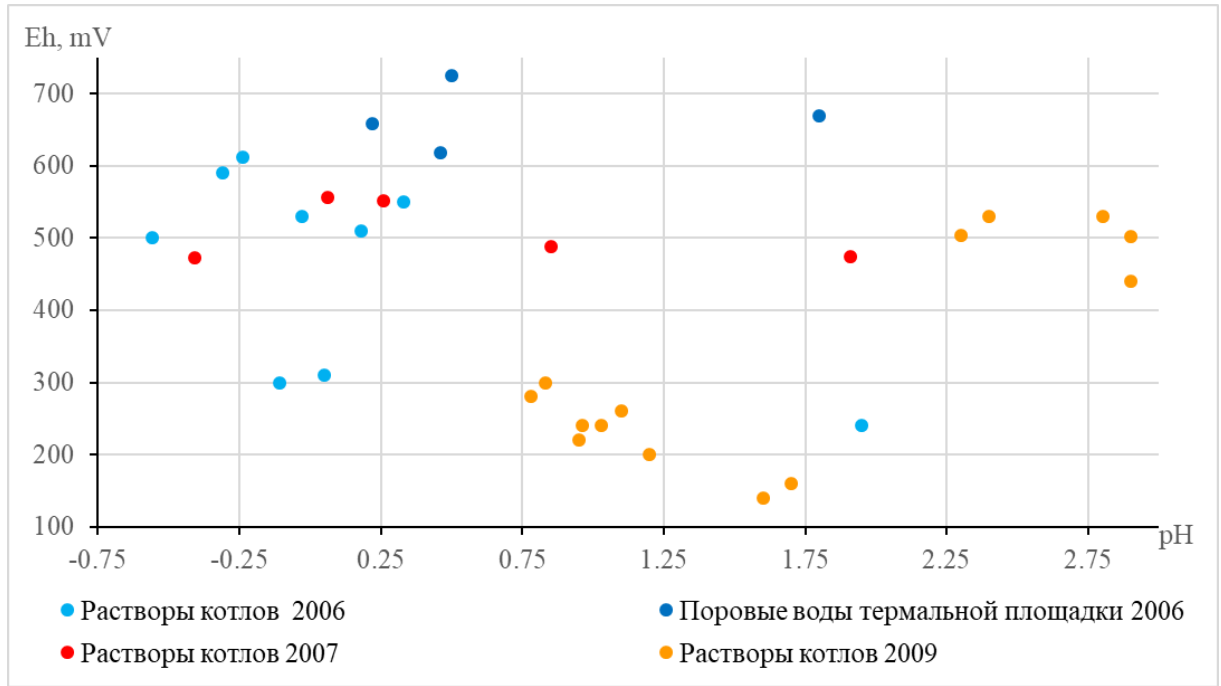


Рисунок 4.12 - Окислительно-восстановительный потенциал в сопоставлении с уровнем кислотности растворов Донного термального поля вулкана Мутновский

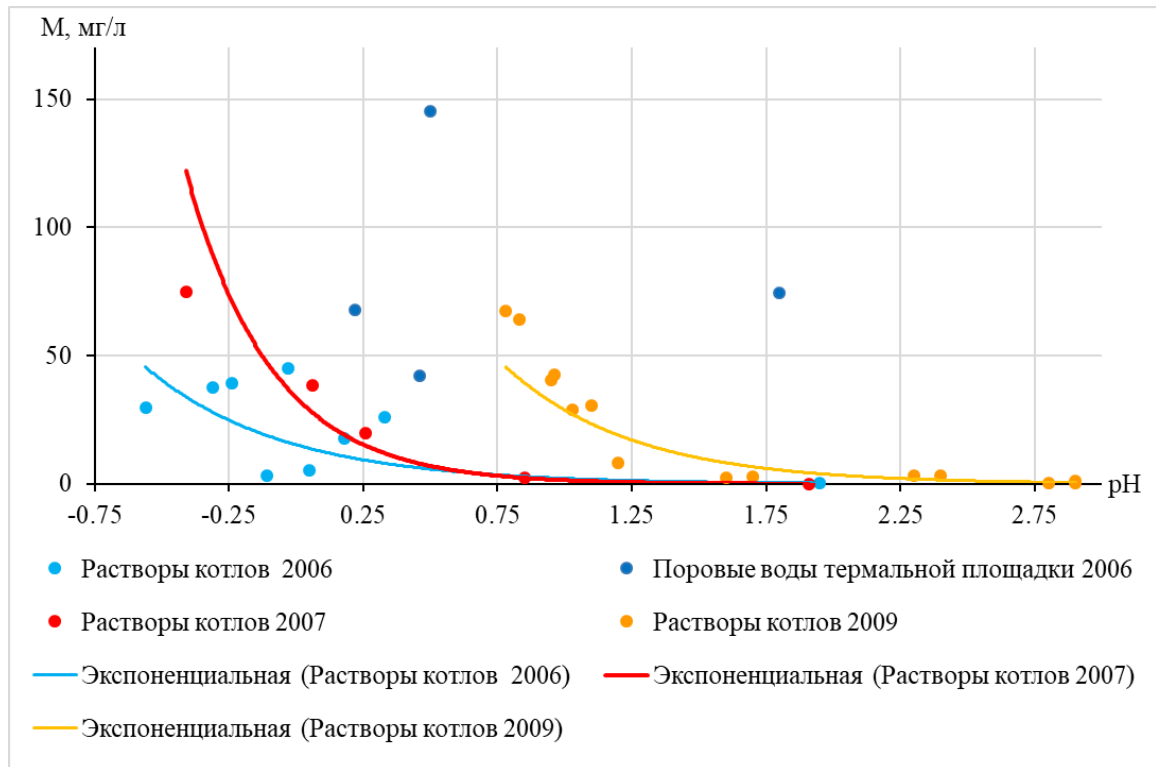


Рисунок 4.13 - Минерализация в г/л по отношению к уровню pH термальных котлов и поровых растворов Донного термального поля Мутновского вулкана за 2006, 2007, 2009 года с экспоненциальными линиями тренда

Однако согласно диаграмме с минерализацией (рис. 4.13) очевидно, что самые солёные растворы были измерены в 2007 году. Поровые воды не показывают экспоненциальной зависимости, распределяясь неравномерно, но имея также самую высокую минерализацию. В то же время параметры растворов котлов, измеренные в 2009 году, визуальнo делятся на две группы – с уровнем рН от 0.75 до 1.75 и укладываемые до 300 mV уровня Eh, и на менее кислые растворы: рН от 2.25 до 3, 500 mV.

4.3.2 Результаты геофизических исследований

С исследованиями 2009 года сравнивались все последующие – и частотное зондирование, и трёхмерная электротомография. Важно и примечательно, что предположительные контуры подводящего канала Большого котла нашли своё отображение во всех видах зондирований.

На рисунке 4.14 представлены результаты электротомографии 2009 и 2020 года (по профилям). В 2020 году при посещении Мутновской вулканологической геошколы от института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН автору удалось выполнить три параллельных профиля электротомографии на Донном термальном поле в непосредственной близости от Большого котла, располагающегося посередине расстановки.

На рисунке видно, что очертания проводящего участка, начинающегося у поверхности посередине термального поля (0.1 – 8 Ом·м), дублируются на всех четырёх профилях, его границы уходят вглубь и прослеживаются вплоть до максимальной глубины исследования – 42 метров. Это свидетельствует об общем источнике тепла и вещества, хоть и удивительно, что котлы со столь разнообразным составом и контрастными параметрами находятся рядом, имеют общий приповерхностный источник.

Конечно же, трёхмерные исследования достаточно сложно осуществимы в кратере, так как профили осложнены рельефом, небольшой величиной площадок, подходящими вплотную к термальному полю стенками кратера. Несмотря на это, было выполнено несколько видов трёхмерных исследований, а конкретно: площадка частотного зондирования в 2009 году, площадка трёхмерной

электротомографии в 2013 году и объединения трёх профилей электротомографии в трёхмерный массив данных в 2020 году (рис. 4.15).

Минерализация указана в г/л

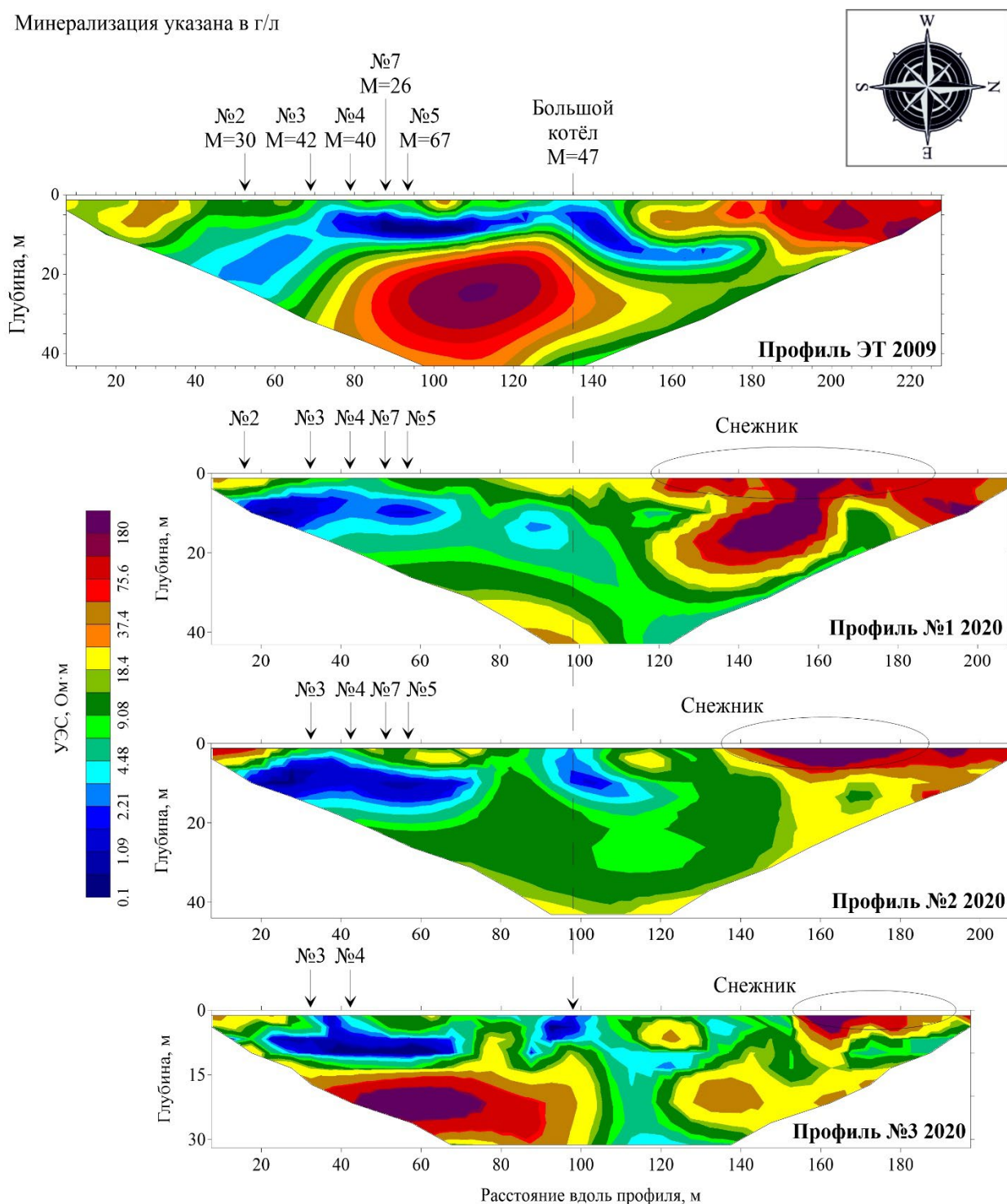
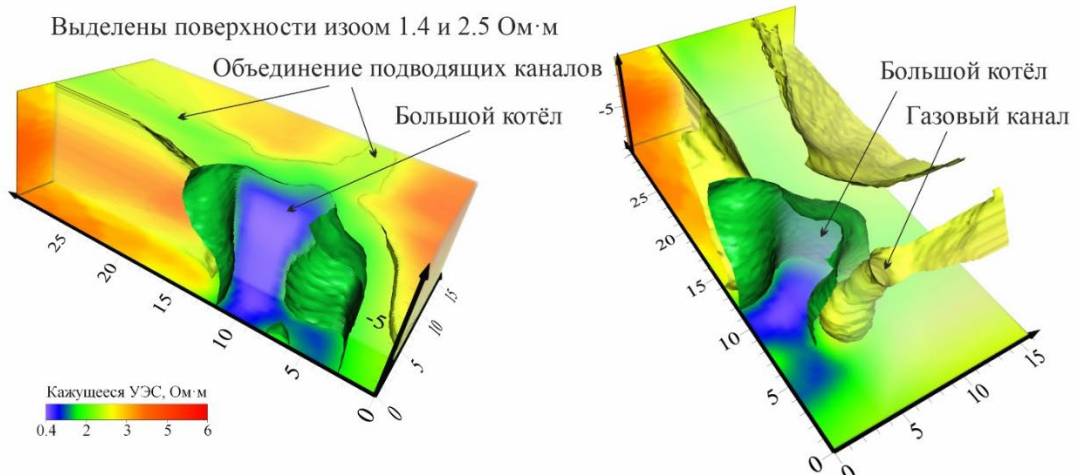


Рисунок 4.14 - Профили ЭТ на Донном термальном поле Мутновского вулкана

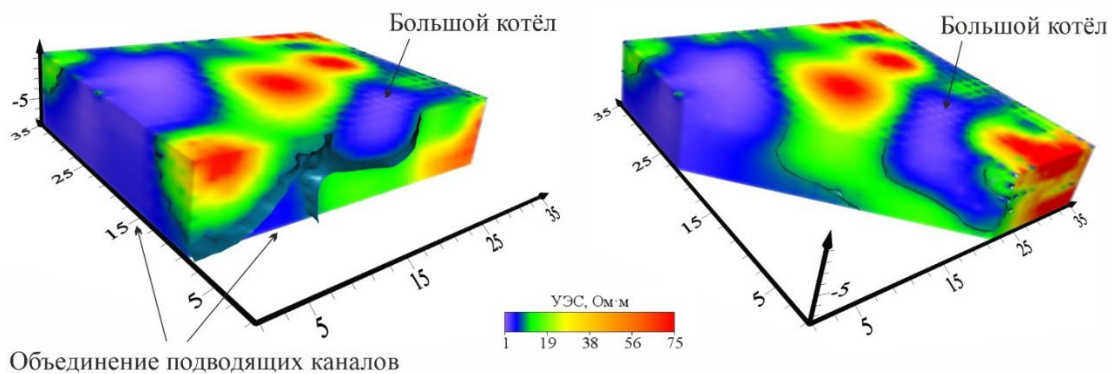
Частотное зондирование по серии профилей, объединённых в трёхмерный массив, дало хорошую визуализацию Большого котла, указало на соединение подводящих каналов термальных котлов в единую структуру на совсем небольшой глубине – не более 8-10 метров (рис. 4.15). Конечно, в случае частотного

зондирования нельзя говорить о точной глубине исследований, так как используется понятие псевдоглубина, однако с помощью дальнейших исследований методом электротомографии удалось подтвердить данные ЧЗ 2009 года.

Результаты трёхмерной визуализации серии профилей частотного зондирования 2009 года
Выделены поверхности изоом 1.4 и 2.5 Ом·м



Результаты трёхмерной электротомографии 2013 года
Выделенная поверхность - изоома 8.8 Ом·м



Результаты трёхмерной электротомографии 2020 года

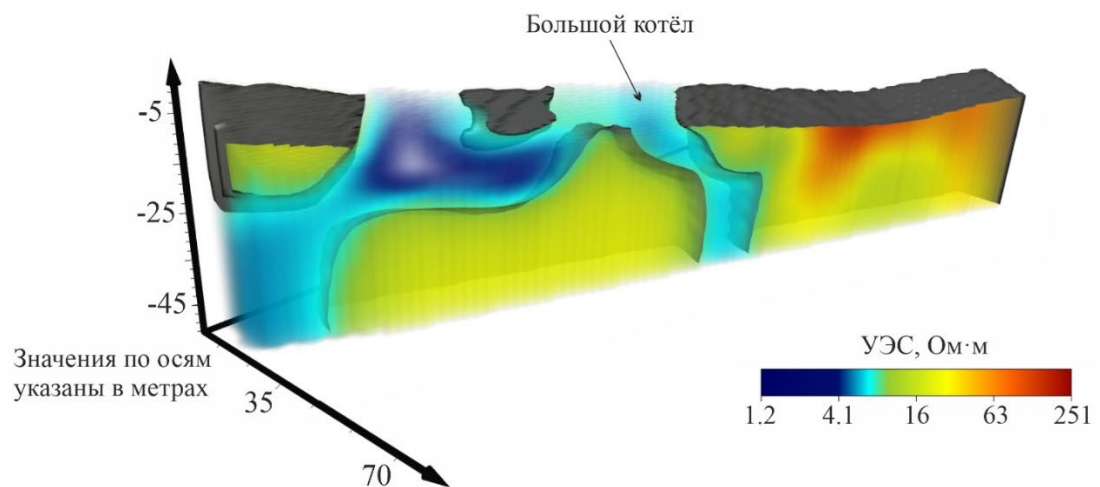


Рисунок 4.15 - Трёхмерные исследования на Донном термальном поле
Мутновского вулкана

В 2013 году работы были затруднены геологическими условиями: прошедшая зима характеризовалась крайне высоким уровнем выпавших осадков, поэтому исследуемая среда местами была сильно увлажнена, что в совокупности с исключительной минерализацией, присущей данному объекту, дало геоэлектрический разрез, обладающий аномально высокой проводимостью. Значения УЭС в таких условиях составляли от 1 до 20 Ом·м, и некоторые комбинации источников-приёмников давали «бесконечный ток», т.е. величины, находящиеся за пределами возможностей измерительного блока применяемой аппаратуры.

В этой связи около 60% полученных точек пришлось считать некорректными. К счастью, эти точки рассредоточены во всём массиве данных. Это позволило восстановить трёхмерную картину строения среды во всём измеряемом объёме, пусть и с меньшей достоверностью.

В результате инверсии полевых данных была построена трёхмерная модель распределения УЭС среды. На рисунке 4.15 в массиве данных выделена изоповерхность значения УЭС 8.8 Ом·м, которая максимально близко отражает границы подводющих каналов Большого грязевого котла и находит отображение в результатах зондирования методом ЭТ 2009 года.

Сопоставление результатов трёхмерной визуализации данных ЧЗ и ЭТ 2009, 2013, 2020 годов демонстрирует корреляцию в положении границ Большого котла, а также проводящего массива под Донным термальным полем. Конечно же, соответствие границ не идеальное - это связано с ежегодными изменениями структуры термального поля, количеством осадков, локальными происшествиями – обвал стенок кратера, сход снежника.

4.3.3 Связь геофизических и геохимических параметров среды

Стоит отметить, что источники с совпадающими номерами, но разных лет отбора проб могут быть совершенно разными. Это обуславливается тем, что термальное поле – как живой организм, постоянно видоизменяется в зависимости от количества осадков в этот год, путей схода снежника с бортов кратера, возможностями изливаться.

Результаты оценки УЭС по эмпирической зависимости для растворов термальных источников Мутновского вулкана вполне сопоставимы с измеренными (табл. 4.3). При этом минерализация источников Донного термального поля зашкаливает, зачастую показывая более 50 грамм на литр. Колебание измеренных и оценочных связано с общей высокой проводимостью среды.

Таблица 4.3 - Измеренные и оценочные параметры для источников Донного термального поля вулкана Мутновского.

Измеренные и оценочные параметры	Растворы котлов 2006							
	СДП-2/06	СДП-3/06	СДП-4/06	СДП-5/06	СДП-6/06	СДП-7/06	СДП-8/06	СДП-9/06
pH	-0.24	-0.31	0.18	-0.03	1.95	0.33	0.05	-0.11
Eh	612	590	510	530	240	550	310	300
M, г/л	39.4	37.7	17.6	45.0	0.2	25.8	5.3	3.3
M, ppm	39 377	37 661	17 640	45 046	249	25 834	5 323	3 291
T, °C	87	87	83	84	76	76	82	77
T, °F	189	189	181	183	169	168	180	171
σ_w	15	14	7	16	0	9	2	1
$\rho_{расч}$, Ом·м	0.07	0.07	0.14	0.06	8.74	0.11	0.45	0.74
$\rho_{эт}$, Ом·м	0.7	1.3	1.7	1.7	4	1.2	1.7	3.3
$\rho_{чз}$, Ом·м	4.5	3	6	10	9	9	4	4

Измеренные и оценочные параметры	Поровые воды термальной площадки 2006			
	СДП-10/06ПВ	СДП-11/06ПВ	СДП-12/06ПВ	СДП-13/06ПВ
pH	0.5	0.46	1.8	0.22
Eh	726	619	669	659
M, г/л	145.6	42.4	74.7	67.9
M, ppm	145 588	42 416	74 747	67 920
T, °C	80	80	80	80
T, °F	176	176	176	176
σ_w	41	15	24	22
$\rho_{расч}$, Ом·м	0.02	0.07	0.04	0.05

Продолжение Таблицы 4.3

Измеренные и оценочные параметры	Растворы котлов 2007				
	СДП- 2/07	СДП- 3/07	СДП- 4/07	СДП- 5/07	СДП- 6/07
pH	-0.41	0.06	0.26	0.85	1.91
Eh	472	556	552	488	474
M, г/л	74.8	38.4	19.7	2.5	0.1
M, ppm	74 789	38 371	19 661	2 537	69
T, °C	80	80	80	80	80
T, °F	176	176	176	176	176
σ_w	24	14	7	1	0.04
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	0.04	0.07	0.14	0.92	28.55
$\rho_{эт}, Ом\cdotм$	0.7	0.7	3	4.2	6
$\rho_{чз}, Ом\cdotм$	3	5	5	10	9

Измеренные и оценочные параметры	Растворы котлов 2009						
	СДП- 1/09	СДП- 2/09	СДП- 3/09	СДП- 4/09	СДП- 5/09	СДП- 6/09	СДП- 8/09
pH	2.9	1.1	0.96	0.95	0.78	1.03	1.2
Eh	440	260	240	220	280	240	200
M, г/л	0.3	30.5	42.5	40.5	67.3	28.7	8.1
M, ppm	333	30 459	42 509	40 458	67 255	28 736	8 055
T, °C	4	94	93	89	93	78	87
T, °F	39	201	199	192	199	172	188
σ_w	0.04	13	17	15	25	10	3
$\rho_{расч}, Ом\cdotм$	25.31	0.08	0.06	0.06	0.04	0.10	0.29
$\rho_{эт}, Ом\cdotм$	6	1.9	1.3	1.3	1.7	1.3	0.7
$\rho_{чз}, Ом\cdotм$	9	4.5	3	6	10	9	4

Продолжение Таблицы 4.3

Измеренные и оценочные параметры	Растворы котлов 2009					
	СДП- 9/09	СДП- 10/09	СДП- 11/09	СДП- 12/09	СДП- 13/09	СДП- 15/09
pH	1.6	0.83	1.7	2.3	2.4	2.9
Eh	140	300	160	503	530	502
M, г/л	2.4	64.3	2.8	3.5	3.4	1.2
M, ppm	2 443	64 334	2 844	3 464	3 360	1 222
T, °C	94	80	80	14	10	14
T, °F	201	176	176	57	50	56
σ_w	1	21	1	1	0.4	0.2
$\rho_{расч}, Ом\cdot м$	0.84	0.05	0.83	1.96	2.27	5.34
$\rho_{эт}, Ом\cdot м$	0.9	4.2	3.5	2	2.2	4.5
$\rho_{чз}, Ом\cdot м$	4	6	5	3	3	3

4.3.4 Выводы

По данным ЧЗ и ЭТ термальные растворы грязевых котлов на Донном поле имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м, несмотря на уникальные химические составы источников. Их разнообразие определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры. Оценочные УЭС сопоставимы по значениям с измеренными.

4.4 Вулкан Эбеко

Исследования на вулкане Эбеко включали в себя множество этапов – от первичного опробования применения методик [Панин, 2010; Панин и др., 2010;] до уточнения верхней части разреза с помощью методов ЭТ и ЧЗ [Панин и др., 2015; Котенко и др., 2018; Панин и др., 2022]. Стоит отметить, что конфигурация и расположение термальных полей и источников вулкана Эбеко сильно менялись за последние годы [Котенко и др., 2010; Котенко и др., 2012; Котенко и др., 2023]. Выполненные исследования являются лишь примером возможного применения методики микротомографии для верификации методов ЭТ и ЧЗ между собой, и для неразрушающего метода контроля туристических маршрутов на природных объектах подобного рода.

4.4.1 Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Геохимическое опробование на термальных источниках вулкана Эбеко выполнялось несколько раз. Результаты геохимических исследований подробно приведены в монографии с участием автора [Бортникова и др., 2013]. Результаты частотного зондирования в сопоставлении с геохимическими параметрами растворов подробно рассмотрены в статье с участием автора [Панин и др., 2015]. В данной работе стоит остановиться на основных параметрах растворов – общей минерализации и кислотно-щелочном потенциале (рис. 4.16). Растворы термальных источников, в основном, ультракислые и высокоминерализованные, относятся к хлорид-сульфатным.

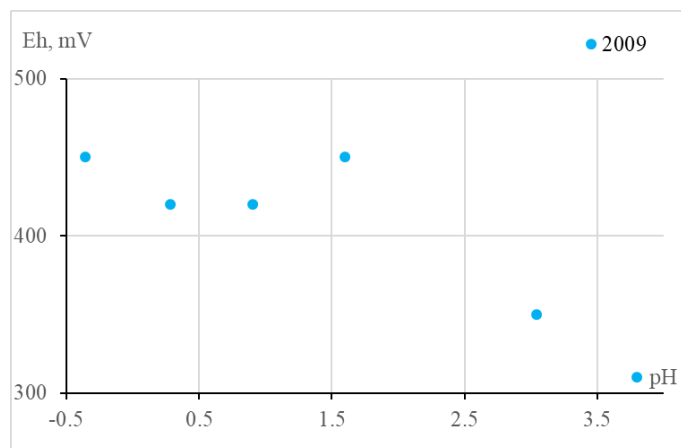


Рисунок 4.16 – Окислительно-восстановительный потенциал растворов вулкана Эбеко по отношению к уровню рН

4.4.2 Результаты геофизических исследований

Исследования лета 2021 года на юго-западном термальном поле вулкана Эбеко увенчались успехом – получен профиль микротомографии (шаг 0.3 м, общая длина профиля порядка 14 метров, эффективная глубина зондирования – 2.5 м). Центром расстановки стала крупная фумарола (рис. 4.17).

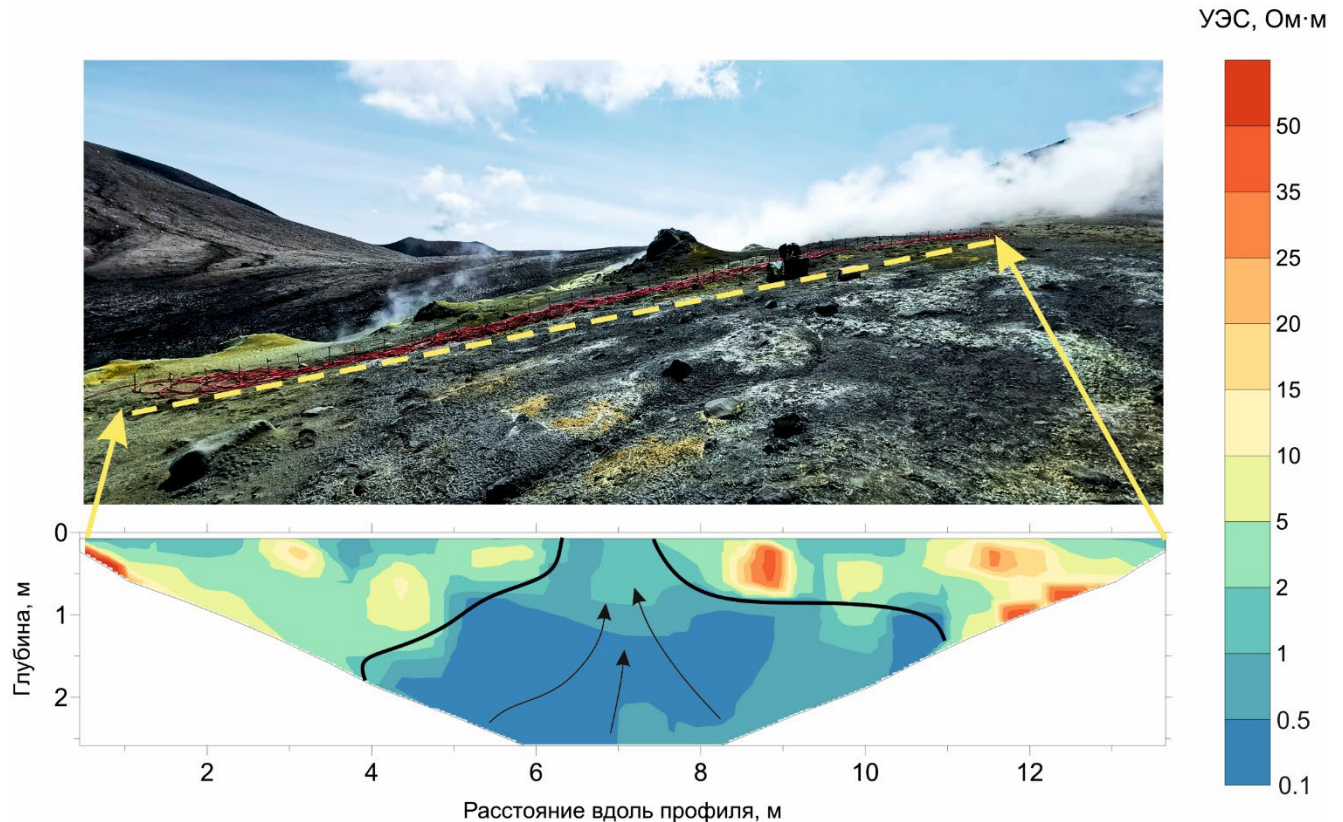


Рисунок 4.17 – Профиль микротомографии на юго-восточном термальном поле вулкана Эбеко. Центр расстановки у большой фумаролы.

Ориентация с юга на север

Профиль традиционно имеет аномально низкое сопротивление, что обусловлено высокой проводимостью среды – гидротермально изменённых пород, насыщенных жидкостью и газами. Несмотря на это, в середине профиля выделяется наиболее проводящая зона: по всей видимости, она включает канал, питающий крупную фумаролу.

4.4.3 Связь геофизических и геохимических параметров среды

Геохимическое опробование источников вулкана Эбеко было выполнено летом 2009 года, когда термальные поля ещё были оформленными площадками с группами источников – грязевых котлов, фумарол, кипящих прозрачных терм. Это

ультракислые высокоминерализованные растворы, Э-Ф/S-3Юв и Э-Ф/S-5Юв – две пробы конденсатов из фумарол. Конечно же, невозможно выполнить геофизические исследования непосредственно на источниках, профили зондирования располагались рядом и приведены в работе [Бортникова и др., 2013]. При общей высокой проводимости среды, что характерно для гидротермально изменённых, насыщенных высокоминерализованными растворами и газами пород, сопротивление аномально низкое. Расчёты по эмпирической зависимости укладываются в диапазоны измеренных УЭС.

Таблица 4.4 - Измеренные и оценочные параметры для источников вулкана Эбеко.

Измеренные и расчётные параметры	2009					
	Э-1	Э-2	Э-3	Э-4	Э-Ф/S-3Юв	Э-Ф/S-5Юв
pH	1.6	0.9	3.8	3.04	-0.36	0.28
Eh	450	420	310	350	450	420
M, г/л	1.9	4.1	0.1	0.4	32	19
M, ppm	1 900	4 100	50	400	32 000	19 000
T, °C	84	70	9.2	17	90	98
T, °F	183	158	49	63	194	208
σ_w	0.9	1.5	0.0	0.1	12.7	8.5
$\rho_{\text{расч}}$, Ом·м	1	1	129	14	0.08	0.12
$\rho_{\text{чз}}$, Ом·м	3	3	20	16	1	2

4.4.4 Выводы

При уменьшении межэлектродного расстояния увеличивается детальность исследования, таким образом становится возможно судить о слоях, сопоставимых по размерам с половиной межэлектродного расстояния – 0.15 м. Этот метод контроля является наиболее точным и неразрушающим. Сравнение результатов ЭТ и ЧЗ описывалось в статьях [Балков и др., 2006], однако, без участия микротомографии. Данная глубина является наиболее эффективной при исследовании безопасности туристических троп и обнаружении купольных пустот под источниками. Учитывая схожесть растворов источников вулкана Эбеко с

растворами Донного поля Мутновского вулкана по минерализации и кислотности, можно сделать предположение о наличии общего питающего канала для разных источников на вулкане Эбеко.

Заключение

Основным результатом диссертационной работы является установление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки приповерхностных гидротерм на примере термальных полей Курило-Камчатской островной гряды, обладающих контрастными типами растворов как по физико-химическим параметрам, так и по содержанию широкого круга химических элементов. Большая разница указанных параметров характерна не только для разных вулканов, но обнаруживается в пределах одного термального поля. Эта разница, по мнению автора, объясняется путями миграции флюидов, степенью их взаимодействия с вмещающими породами, соотношением метеорных вод и флюидов глубинного генезиса.

В работе определена геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства термальных полей с помощью ЧЗ и ЭТ, установлена качественная и количественная связь геофизических и геохимических параметров среды, проинтерпретированы результаты геофизических и геохимических исследований для определения строения подповерхностного пространства гидротермальных систем.

Результатом диссертационной работы являются полученные с помощью ЧЗ и ЭТ геоэлектрические характеристики верхней (до 45 метров) части разреза, отображающие каналы гейзеров и грязевых котлов. Установлено, что грязевые котлы на термальных площадках кальдеры вулкана Узон разгружаются через серию трубообразных выходов. Построены геоэлектрические модели, описывающие зональность внутренних частей термального поля, которая определяется, главным образом, соотношением жидкой и твёрдой фазы. Минерализация и уровень концентрации элементов в жидкой фазе зависит от доли флюида, взаимодействующего с вмещающими породами, что и определяет электропроводность системы «вода-порода». По результатам интерпретации данных ЭТ установлено, что гейзеры Академии Наук (гидротермы системы озера Карымского) питаются из единой обводнённой линзы, расположенной на глубине от 5 до 20 метров; питающие каналы гидротерм Медвежьих и горячих выходов на

полуострове Новогодний уходят корнями к общему источнику, тяготеющему к кратеру Токарева. По данным ЧЗ и ЭТ термальные растворы грязевых котлов на Донном фумарольном поле вулкана Мутновский с уникальным химическим составом имеют один питающий канал, прослеженный до глубины более 40 м. Разнообразие составов термальных разгрузок определяется вариациями соотношения флюид/метеорные воды и степенью взаимодействия растворов с вмещающими породами. Согласно построенной геоэлектрической модели, выходы ультракислых высокоминерализованных растворов грязевых котлов имеют чётко прослеживаемые стабильные структуры. Учитывая схожесть растворов источников вулкана Эбеко с растворами Донного поля Мутновского вулкана по минерализации и кислотности, можно сделать предположение о наличии общего питающего канала для разных источников на вулкане Эбеко.

Результаты электротомографии, частотного зондирования и пересчёт минерализации проб в электрическое сопротивление использованы при определении путей разгрузки термальных источников. Предложено объяснение контрастности растворов – различные пути миграции флюида в приповерхностном пространстве, переход химических элементов из вмещающих пород в растворы в верхних горизонтах. Следует подчеркнуть оригинальность и надёжность выбранного комплекса методов – ЧЗ дополняет ЭТ деталями; геохимическое опробование, результаты анализов позволяют привязать значения удельного электрического сопротивления к определённому участку гидротермального поля.

Результаты расчётов электрического сопротивления, произведённых по формуле Муанфара, проанализированы для каждого из объектов и сопоставлены с результатами интерпретации ЭТ и ЧЗ. Учитывая различный масштаб методов оценки УЭС, при интерпретации во внимание принималась их непротиворечивость и общие тенденции.

Описанный в настоящей работе комплекс для исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения каналов миграции флюидов и исследования гидротермальных месторождений, мониторинга процессов разработки гидротермальных

месторождений, обеспечения безопасности туристических троп на любых термальных полях.

Сопоставление результатов ЧЗ и ЭТ, в том числе, и в трёхмерной модификации, показало их эффективность при определении подводящих каналов источников на термальных полях активных вулканов. Надёжные результаты получены несмотря на общую высокую электропроводность флюидонасыщенной среды, наличие больших контрастов, например, между газовыми источниками-изоляторами и грязевыми котлами, предельно насыщенными солями.

Перспективы развития выполненного исследования просматриваются как в прикладных, так и в научно-исследовательских направлениях. Прикладной задачей является доразведка геотермальных ресурсов, например, на территории крупнейшей геотермальной электростанции России – Мутновской. Научно-исследовательской задачей является расширение комплекса методов геофизики для исследования термальных полей – включение сейсмических и магнитотеллурических методов, увеличение глубинности и детальности при определении структуры подводящих каналов термальных полей.

Список сокращений

- УЭС** Удельное электрическое сопротивление горных пород является параметром вещества, характеризующим его способность пропускать электрический ток при возникновении электрического поля, измеряется в Ом·метрах [Методическое пособие: Основы геофизических методов, 2007].
- ЧЗ** «Метод электромагнитного зондирования, при котором исследуются геоэлектрические разрезы посредством измерения на поверхности Земли компонент гармонического электромагнитного поля на разных частотах. Для создания гармонического поля используется вертикальный диполь магнитный (незаземленная петля) или горизонтальный диполь электрический (заземленный кабель). В разных модификациях ЧЗ применяются различные сочетания магнитных и электрических генераторных диполей, и приемных установок. Наиболее эффективны установки с электрическим питающим диполем при измерении осевой или экваториальной компоненты электрического поля, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Измерения магнитной компоненты обеспечивают возможность разведки под экранами высокого сопротивления. Основным параметр разреза, определяемый ЧЗ – кажущееся удельное электрическое сопротивление.» [Геологический словарь, 2012].
- ЭТ** «Электротомография (ЭТ)–это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Её особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле положения электродов. Количество их может достигать нескольких десятков и сотен штук. Такой подход позволяет с одной стороны, работать с современной

высокопроизводительной аппаратурой, а с другой стороны, проводить интерпретацию данных электротомографии в рамках двумерных и трехмерных моделей» [Шеин, Оленченко, 2021].

Словарь терминов

Гидротермы: «Горячие водные растворы (часто обогащённые газовыми компонентами), циркулирующие в земной коре и способствующие миграции в ней химических элементов и отложению минеральных веществ. Соотношение газовой и жидкой фаз в гидротермах зависит от температуры, давления и состава. Образуются главным образом при дегазации мантии, кристаллизации магмы, дегидратации и декарбонатизации горных пород при метаморфизме, реже в результате диагенеза пород, высвобождения растворов из порового пространства при их уплотнении под действием гравитационных или тектонических сил, нагрева проникающих в недра Земли атмосферных и морских вод и их взаимодействия с окружающими горными породами. К гидротермам относят воды, температура которых выше 25–50 С, температурный максимум гидротерм 950 С» [Бортников, 2022].

Зональность: географическая (природная зональность) - особая форма территориальной дифференциации географической оболочки Земли, выраженная в последовательном изменении природных условий и ландшафтов [Лукашова, БСЭ].
Геоэлектрическая зональность - дифференциация пространства в связи с его неоднородностью по признаку различия физических свойств, удельного электрического сопротивления.

Источник: сосредоточенный естественный выход подземной воды непосредственно на земную поверхность или под водой (подводный источник) [Геологический словарь, 1973].

Модель; физико-геологическая модель (ФГМ): возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и контрастность физических которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные объекты, подлежащие обнаружению. Иначе, ФГМ это система абстрактных возмущающих тел и вызываемых ими аномальных эффектов, аппроксимирующих геологический объект и с необходимой для моделирования детальностью отражающих его структуру, размеры, форму, петрофизические свойства и соответствующее им объемное распределение физических полей. Составляющими ФГМ являются

геологическая модель, петрофизическая модель и модели физических полей. Геологическая модель - система элементов геологического строения, обобщенно описывающая состав, структуру, форму изучаемого объекта и его вмещающей среды. Изучаемый объект на фоне вмещающей среды может быть хорошо виден или не виден вообще. Петрофизическая модель (ПФМ) характеризует распределение физических свойств в плане, разрезе, пространстве. Модель физических полей описывает характер физического поля в верхнем и нижнем полупространстве, его интенсивность, форму, аномалии и помехи.

Разгрузка: в данной работе имеется в виду разгрузка гидротермальных вод, а конкретно выход термальных растворов на дневную поверхность непосредственно из пород/гидротермально изменённых пород [Аверьев, 1961].

Список литературы

1. Абросимова Н. А. Геохимия газогидротермальных источников вулканов Эбеко и Мутновский: дис. – 2013.
2. Аверьев В. В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки /Труды лаборатории вулканологии АН СССР. – 1961. – С. 80-98.
3. Антащук К. М., Сараев А. К., Прокофьев О. М. Опыт применения АМТ-зондирований при поисках геотермальных источников на п-ове Камчатка / Вопросы геофизики. Выпуск 45. СПб., 2012 — (Ученые записки СПбГУ; №445), с. 79-94.
4. Балков Е. В. Технология малоглубинного частотного зондирования / Геофизика. – 2011. – №. 6. – С. 42-47.
5. Балков Е. В., Карин Ю. Г., Позднякова О. А., 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., Манштейн А. К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании / Геофизический вестник, 2001, №12, с. 17-20.
7. Балков Е. В. Манштейн, А. К., Чемякина, М. А., Манштейн, Ю. А., Эпов, М. И. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач / Геофизика. – 2006. – Т. 1. – С. 43-50.
8. Балков Е. В., Фадеев Д. И., Карин Ю. Г., Позднякова О. А., Панин Г. Л., Лехнович, А. В. Комплексное применение и сопоставление результатов электромагнитного профилирования и электротомографии при исследовании археологических памятников // Геофизика. – 2021. – №. 6. – С. 68.
9. Балков Е. В., Эпов М. И., Манштейн А. К. Математическое обеспечение комплекса малоглубинного электромагнитного зондирования / IV международная научно-практическая геолого-геофизическая конкурс-конференция молодых ученых и специалистов «Геофизика-2003»: Тез. докл. СПб. – 2003. – С. 22-24.
10. Балков Е. В., Эпов М. И., Манштейн А. К. Оценка глубинности наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования // Геофизика. – 2006. – Т. 200. – С. 41-44

11. Белоусов А. Б. Закономерности распространения и механизм извержений мааров полуострова Камчатка / Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2006. – Т. 406. – №. 4. – С. 492-495.
12. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
13. 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 - N 12 - с.79-90.
14. Бобачев А. А., Модин И. Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами Введение. – 2008.
15. Бортников Н. С. Гидротермы / Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: <https://bigenc.ru/c/gidrotermy-f4947e/?v=8344832>. – Дата публикации: 21.11.2022. – Дата обновления: 09.09.2023.
16. Бортникова С. Б., Бессонова Е. П., Гора М. П., Шевко А. Я., Панин Г. Л., Ельцов И. Н., Жарков Р. В., Котенко Т. А., Бортникова С. П., Манштейн Ю. А., Котенко Л. В., Козлов Д. Н., Абросимова Н. А., Карин Ю. Г., Поспеева Е. В., Казанский А. Ю. / Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис. ИНГГ СО РАН – Новосибирск – 282с. – 2013.
17. Бортникова С. Б. Бессонова Е. П., Трофимова Л. Б., Котенко Т. А., Николаева И. В. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. – 2006. – №. 1. – С. 39-51.
18. Бортникова С. Б., Гавриленко Г. М., Бессонова Е. П., Лапухов А. С. / Гидрогеохимия термальных источников вулкана Мутновский (южная Камчатка) / Вулканология и сейсмология. – 2009. – №. 6. – С. 26-43.
19. Вакин Е. А., Кирсанов И. Т., Пронин А. А. Активная воронка Мутновского вулкана / Бюллетень вулканологических станций. – 1966. – №. 40. – С. 25-35.
20. Ваньян Л. Л. О моделях глубинной электропроводности / Изв. АН СССР. Физика Земли, 1991 г., № 5, с. 57-66.
21. Ваньян Л. Л. Флюиды в верхней части консолидированной коры в свете данных геоэлектрики / Физика Земли, 1994 г., № 6, с. 89-96.
22. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования / Москва, Научный мир, 1997.

23. Веселов О. В., Волгин П. Ф., Лютая Л. М. Строение осадочного чехла Пугачевского грязевулканического района (о. Сахалин) по данным геофизического моделирования / Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31 - № 6 - С. 4–15.
24. Вергасова Л. П., Карпов Г. А., Лупкина Е. Г., Андреев В. И., Надежная Т. Б. Постэруптивная деятельность в кальдере Академии Наук (Камчатка): минеральные новообразования, содержание радона в спонтанных газах и биотические изменения / Вулканология и сейсмология. – 1998. – №. 2. – С. 49-65.
25. Вилор Н. В. Мироманов А. В., Давыденко Ю. А., Шкиря М. С., Вилор А. М. Применение комплекса поисковых методов для прогноза термальных вод в Прибайкалье, Восточная Сибирь / Росгеология. В поисках новых открытий. – 2018. – С. 18-21.
26. Гавриленко Г. М., Гавриленко М. Г. Гидрохимические предвестники извержения вулкана Мутновский (Камчатка) в марте 2000 г / Вестник МГУ. Сер.: Геология. – 2004. – №. 4. – С. 25.
27. Гавриленко Г. М., Мельников, Д. В., Зеленский, М. Е., Тавиньо, Л. Многолетний гидрогеохимический мониторинг вулкана Мутновский (Камчатка) и фреатическое извержение вулкана в апреле 2007 г. / Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2007. – №. 1. – С. 127-132.
28. Геологический словарь. М.: Недра. 1973. Т. 1. 487 с.
29. Геологический словарь: в 3 томах. Том 3. – Издание 3-е, переработанное и дополненное. – Санкт-Петербург: Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, 2012. – 436 с.
30. Грахова С. П., Бортникова С. Б., Панин Г. Л. Результаты трёхмерной электротомографии кратера Токарева (Карымский вулканический центр, Камчатка) / Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» – 2020. – С. 373-384.
31. Грахова С. П., Ельцов И. Н., Фаге А. Н. Комплексное описание геотермальных полей вулканов Мутновский и Эбеко на основе геохимических и геофизических исследований // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле

- (г. Новосибирск, 19-23 ноября 2018 г.): Материалы конференции – ИПЦ НГУ – Новосибирск – С. 150-152 – 2018
32. Гришин С. Ю. Излияние лавовых потоков на Камчатке в XX и начале XXI века: масштабы и глубина изменения экосистем / Известия Русского географического общества. – 2017. – Т. 149. – №. 6. – С. 43-59.
33. Добрецов Н. Л., Василевский А. Н. Гравитационное поле, рельеф и вулканические комплексы Камчатки и зоны соединения с Алеутской дугой // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – №. 7. – С. 972-999.
34. Добрецов Н. Л., Кулаков И. Ю., Литасов Ю. Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки / Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – №. 12. – С. 1633-1661.
35. Журавлев В. И., Сидорин А. Я. Частотное электромагнитное зондирование одиночными импульсами / Изучение природы вариаций геофизических полей. – 1994. – С. 134-147.
36. Зеленский М. Е., Овсянников А. А., Гавриленко Г. М., Сеньюков С. Л. Извержение вулкана Мутновский (Камчатка) 17 марта 2000 г / Вулканология и сейсмология. – 2002. – №. 6. – С. 25-28.
37. Каевицер В. И. Разманов В. М., Кривцов А. П., Смольянинов И. В., Долотов С. А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией / Радиотехника. – 2008. – №. 8. – С. 35-42.
38. Каймонова О. О., Шкиря М. С., Бадминов, П. С., Давыденко Ю. А. Перспективы развития геотермальной энергетики / Печатается по решению редакционно-издательского совета ИРНТУ. – 2018. – С. 287.
39. Калачева Е.Г. Поведение микроэлементов в ультракислых сульфатно-хлоридных термальных вулканических водах Курильских островов / Материалы XXVIII конференции, посвященной Дню вулканолога. ИВИС ДВО РАН. - 2025 г. – С. 270-273.
40. Калачева Е. Г., Волошина Е. В. Геохимическая характеристика термальных источников привершинной части вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2022. – №. 2. – С. 6-19.
41. Карпов Г. А. Некоторые геохимические особенности подводного извержения в кальдере Академии Наук 2-3 января 1996 г. / Вестник Камчатской региональной

- организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2004. - № 4, С. 81-89.
42. Карпов Г. А., Лупикина Е. Г., Андреев В., Самкова Т. Ю. Воздействие вулканизма на окружающую среду (на примере извержений в кальдере Академии Наук и вулкана Карымский) / Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2007. – №. 2. – С. 83-99.
43. Карпов Г. А., Николаева А. Г., Алёхин Ю. В. Содержание и источники редкоземельных элементов в современных вулканогенных гидротермальных системах Камчатки /Петрология. – 2013. – Т. 21. – №. 2. – С. 163-163.
44. Кирюхин А. В., Леонов В. Л., Слобцов И. Б., Делемень И. Ф., Пузанков М. Ю., Поляков А. Ю., Зеленский М. Е. Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт / Вулканонология и сейсмология. – 2005. – №. 5. – С. 19-44.
45. Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В. Магматические питающие системы Корьякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников /Вулканонология и сейсмология. – 2017. – №. 5. – С. 3-17.
46. Котенко Т. А. Извержение вулкана Эбеко в 2023-2025 гг.: мониторинг с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и фотокамер покадровой съемки / Т. А. Котенко // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 24–29 марта 2025 года. – Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2025. – С. 81-84.
47. Котенко Т. А., Калачева Е. Г. Гидрологический и гидрохимический режим кратерного озера вулкана Эбеко (1951-2020 гг.), о. Парамушир //Вулканизм и связанные с ним процессы. – 2021. – С. 125-128.
48. Котенко Т. А., Котенко Л. В. Новое озеро в кратере Корбута вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) //Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2022. – №. 1. – С. 5-11.
49. Котенко Т. А., Котенко Л. В., Сандимирова Е. И., Шапарь В. Н., Тимофеева И. Ф. Извержение вулкана Эбеко в январе-июне 2009 г. (остров Парамушир,

- Курильские о-ва) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2010. – №. 1. – С. 57-68.
50. Котенко Т. А., Котенко Л. В., Сандимирова Е. И., Шапарь В. Н., Тимофеева И. Ф. Эруптивная активность вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2010-2011 гг // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2012. – №. 1. – С. 160-167.
51. Котенко Т. А., Мельников Д. В., Тарасов К. В. Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003–2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы активности // Вулканология и сейсмология. – 2022. – №. 4. – С. 31-46.
52. Котенко Т. А. Панин Г. Л., Балков Е. В., Фадеев Д. И. Применение малоглубинной электроразведки для изучения гидротермальных объектов вулкана Эбеко (остров Парамушир) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2018. – №. 2 (198). – С. 101-109.
53. Котенко Т. А., Смирнов С. З., Тимина Т. Ю. Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: механизм и продукты извержения // Вулканология и сейсмология. – 2023. – Т. 4. – С. 3-22.
54. Кугаенко Ю. А., Мельников Д. В. О некоторых аспектах техногенного воздействия Мутновского геознергетического комплекса (Южная Камчатка, Россия) на окружающую среду /Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – №. 5. – С. 56-63.
55. Куликов В. А., Каминский А. Е., Яковлев А. Г. Совместная инверсия данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований при решении рудных задач /Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18. – №. 3. – С. 27-44.
56. Лаверов Н. П. Новейший и современный вулканизм на территории России. – 2005.
57. Лубнина Н. В., Крылов, О. В., Бычков, А. Ю., Модин, И. Н., Скобелев, А. Д., Козлова, Е. В., Паленов, А. Ю. Особенности сульфидной минерализации гидротермальной системы мыса Фиолент (юго-западный Крым) / Георесурсы. – 2024. – Т. 26. – №. 1. – С. 20-37.
58. Лукашова Е. Н. Зональность / Большая советская энциклопедия (БСЭ): научно-образовательный портал – URL: <https://niv.ru/doc/encyclopedia/bse/fc/slovar-199-33.htm>

59. Манштейн Ю. А., Балков Е. В., Манштейн А. К. Исследование подповерхностного пространства методом электромагнитного индукционного частотного зондирования: методика и оборудование /Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 5. – С. 194-197.
60. Манштейн Ю. А., Бортникова, С. Б., Манштейн, А. К., Гавриленко, Г. М., Верниковская, И. В., Сезько, Н. П. Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка) / Доклады Академии Наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2008. – Т. 423. – №. 3. – С. 383-388.
61. Манштейн Ю. А., Шапаренко И. О., Балков Е. В., Манштейн А. К., Карин Ю. Г., Егоров В. Е. Поиск микросфер в золоотвале методами электротомографии и электромагнитного профилирования // Инженерные изыскания. – 2015. – №. 13. – С. 58-61.
62. Мелекесцев И. В. Двигало В. Н., Кирьянов В. Ю., Курбатов А. В., Несмачный И. А. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Часть I. – 1993.
63. Меняйлов И. А., Никитина Л. П., Будников В. А. Активность вулкана Эбеко в 1987-1991 гг.; характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск //Вулканоология и сейсмология. – 1992. – №. 5-6. – С. 21-33.
64. Методическое пособие «Основы геофизических методов» для студентов геологических специальностей / МГУ, Москва, 2007.
65. Модин И. Н., Скобелев А. Д., Валиулина А. М., Степченков В. С. Электротомографические исследования в кальдере Узон на гейзере Шаман (полуостров Камчатка) / Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2023. – №. 4. – С. 22-34.
66. Модин И. Н., Шевченко, В. А., Скобелев, А. Д., Приходько, А. Д., Гиренко, Е. Ю. Применение геофизических методов для поиска фундамента древнегреческой базилики на Борисоглебском грязевом вулкане / ГЕОСОЧИ-2022. Тематическая сессия: " Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики". – 2022. – С. 73-79.
67. Мороз Ю. Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки / М: Наука, 1991 г., 181 с.
68. Мороз Ю. Ф., Гонтовая Л. И. Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным / Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской

- островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск - Камчатский, 2001 г., 428 с.
69. Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А. Геоэлектрические свойства среды в районе пункта комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» (Южная Камчатка) / Вулканонология и сейсмология, 2011, № 5, с. 3-16.
70. Муравьев Я. Д., Леонов В. Л., Мелекесцев И. В., Ушакова С. Н., Калачева Е. Г., Самойленко С. Б. Современный вулканизм и связанные с ним процессы. / Тезисы докладов научной конференции, посвященной Дню вулканолога, ИВиС ДВО РАН, 2010.
71. Неведрова Н. Н., Санчаа А. М., Шапаренко И. О., Суродина И. В. Оценка возможности восстановления разломной зоны методом электротомографии по данным численного моделирования / Материалы XVI всероссийского семинара «Геодинамика. Геомеханика и геофизика». – 2016. – С. 32-33.
72. Ненюкова А. И., Спичак В. В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро-и теплофизических свойств пород / Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – №. 1 (82). – С. 6-19.
73. Нестерова Г. В., Ельцов И. Н., Кашеваров А. А. Методика комплексной обработки данных повторного электрического и электромагнитного каротажа / Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 2. – С. 60-64.
74. Нуждаев И. А., Рычагов С. Н., Феофилактов С. О., Букатов Ю. Ю. Геолого-геофизическое моделирование структуры гидротермальной системы южной группы термальных полей Камбального вулканического хребта (Камчатка) // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65, № 5. – С. 727-741.
75. Нуждаев И. А., Феофилактов С. О. Магнитометрические исследования в районе крупнейшего пародоминирующего геотермального месторождения на Камчатке // Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского 11-15 февраля 2013 г. — Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2013. С. 818– 822.
76. Нурмухамедов А. Г., Чернев И. И., Алексеев Д. А., Яковлев А. Г. Трехмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм / Физика Земли. 2010. №9. С.15–26.

77. Оленченко В. В., Осипова П. С. Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото / Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – №. 1. – С. 117.
78. Осипова П. С., Федорченко А. Ю., Фокин М. И. [и др.] Первые результаты электротомографии археологического памятника Домашнее озеро в Центральной Камчатке / Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. – 2023. – Т. 29. – С. 253-258.
79. Панин Г. Л. Разработка аппаратурно-программного комплекса для наземных малоглубинных индукционных частотных зондирований: дис. – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. АА Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 2010.
80. Панин Г. Л., Гора М. П., Бортникова С. П., Шевко Е. П. Подповерхностная структура Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко (о. Парамушир) по данным геоэлектрических и геохимических исследований // Тихоокеанская геология. – 2015. – Т. 34. – №. 4. – С. 67-78.
81. Панин Г. Л., Котенко Т. А., Балков Е. В. Сравнение электромагнитного профилирования и электротомографии на приповерхностных структурах вулканогенных объектов Курильских островов и Камчатки / ГЕОСОЧИ-2022. Тематическая сессия: " Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики". – 2022. – С. 18-23.
82. Панин Г. Л., Котенко Т., Котенко Л. В., Карин Ю. Г. Геофизико-геохимические исследования термальных полей вулкана Эбеко (о. Парамушир) / Литосфера. – 2010. – №. 3. – С. 171-176.
83. Портнягин М. В., Наумов В. Б., Миронов Н. Л., Белоусов И. А., Кононкова Н. Н. Состав и эволюция расплавов извержения 1996 года в Карымском озере (Восточная Камчатка) по данным изучения включений в минералах / Геохимия. – 2011. – №. 11. – С. 1153-1178.
84. Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов И. Ю. Методы анализа природных вод / М.: «Недра», 1970, 488 с.
85. Романов Д. Б., Манштейн Ю. А. Методика изучения подповерхностных аномалий удельного электрического сопротивления / Геофизические методы в инженерных изысканиях, 2011, с. 72-77.
86. Рычагов С. Н. Исследования Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном районе на

Камчатке / Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2008. – №. 2. – С. 203-206.

87. Рычагов С. Н., Калачева Е. Г., Белоусов В. И., Котенко Т. А., Котенко Л. В. Концептуальная структурно-гидродинамическая модель Северо-парамуширской гидротемально-магматической конвективной системы // Современный вулканизм и связанные с ним системы. Петропавловск-Камчатский. – 2003. – С. 111.
88. Рычагов С. Н., Сергеева А. В., Кравченко О. В., Кузьмина А. А. Макрокомпонентный состав и генезис поровых растворов гидротермальных глин Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) // Геология и Геофизика. – 2025. – Т. 100. – С. 1-21.
89. Сайт ООО «КБ Электротри» [Электронный ресурс] / URL: <https://kbelectrometry.ru>; <https://nemfis.ru>.
90. Сафонов Д. А. Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – №. 2. – С. 175-188.
91. Селянгин О. Б. Новое о вулкане Мутновский: строение, развитие, прогноз / Вулканология и сейсмология, 1993, № 1. с. 17 – 35.
92. Селянгин О. Б. Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). III. Гореловский вулканический центр Мутновского геотермального района / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. S31. – С. 401-437.
93. Смирнов С. З., Кулаков И. Ю. «Миссия выполнима»: услышать дыхание вулкана Эбеко // Наука из первых рук. – 2021. – №. 1-2. – С. 128-151.
94. Собисевич А. Л., Нечаев Ю. В., Арбузкин В. Н. и др. Новые геофизические данные о структуре магматических образований в районе Эльбрусского вулканического центра / Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. с. 272-285.
95. Спичак В. В., Борисова, В. П., Файнберг Э. Б., Халезов А. А., Гойдина А. Г. Трёхмерная электромагнитная томография Эльбрусского вулканического центра по магнитотеллурическим и спутниковым данным / Вулканология и сейсмология, 2007, № 1, с. 58-73.

96. Таран Ю.А., Калачева Е.Г. Ультракислые и ультращелочные воды Курило-Камчатского региона. Формирование и смежные проблемы / Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. ИВиС ДВО РАН. - 2024 г. – С. 265-268.
97. Троицкий В. Д. Краткий геоморфологический очерк района Карымского вулкана. – 1947. – С. 49 – 88.
98. Фадеев Д. И., Бортникова С. П., Фаге А. Н. Исследования активных вулканических областей Камчатки методами электротомографии / Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 2. – №. 3. – С. 113-118.
99. Федотов С. А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме. – 1997.
100. Федотов С. А., Масуренков Ю. П. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. – 1991.
101. Феофилактов С. О. Блоковая структура Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка): новая геолого-геофизическая модель: дис. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022.
102. Феофилактов С. О., Рычагов С. Н., Логинов В. А., Букатов Ю. Ю., Нуждаев И. А., Клементьев М. А., Денисов Д. К. Глубинное строение района Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 40–56.
103. Хубаева О. Р., Бергаль-Кувикас О. В., Сидоров М. Д. Проблема формирования и питания Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова) / Вулканология и сейсмология. – 2022. – №. 3. – С. 43-49.
104. Шевцов А. Н. Обработка и интерпретация данных глубинного частотного зондирования в комплексе с аудиомагнитотеллурическими измерениями (эксперимент «Мурман-2018») / Наука и технологические разработки. – 2019. – Т. 98. – №. 4. – С. 19-33.
105. Шеин А. Оленченко В. В. Прямые и обратные задачи электротомографии для рудной геофизики / Учебно-методическое пособие. Новосибирск: Издательско-полиграфический центр НГУ, 2021. – 130 с.
106. Эпов М. И., Молодин В. И., Манштейн А. К., Балков Е. В., Дядьков П. Г., Матасова Г. Г., Кулешов Д. А. Мультидисциплинарные археолого-

- геофизические исследования в Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – №. 3. – С. 603-614.
107. Abdallah S. Utsugi, M., Aizawa, K., Uyeshima, M., Kanda, W., Koyama, T., Shiotani, T. Three-dimensional electrical resistivity structure of the Kuju volcanic group, Central Kyushu, Japan revealed by magnetotelluric survey data /Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2020. – Т. 400. – С. 106898.
108. Adabanija M.A., Kolawole L.L., Afolabi A.O., Osinowo O.O. Investigating aquifer structure in a low-latitude crystalline basement complex of southwestern Nigeria using radial vertical electrical sounding /Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Т. 14. – С. 1-14.
109. Aizebeokhai A.P., Olayinka A.I., Singh V.S., Oyebanjo O.A. Experimental evaluation of 3D geoelectrical resistivity imaging using orthogonal 2D profiles / 13th SAGA Biennial & 6th AEM conferences, October 2013, p. 100.
110. Arowoogun K.I., Osinowo O.O. 3D resistivity model of 1D vertical electrical sounding (VES) data for groundwater potential and aquifer protective capacity assessment: A case study /Modeling Earth Systems and Environment. – 2022. – Т. 8. – №. 2. – С. 2615-2626.
111. Aiuppa A. Allard P., D'alessandro W., Michel A., Parello F., Treuil M., Valenza M. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily) /Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2000. – Т. 64. – №. 11. – С. 1827-1841.
112. Balasco M., Lapenna, V., Rizzo, E., & Telesca, L. Deep electrical resistivity tomography for geophysical investigations: the state of the art and future directions /Geosciences. – 2022. – Т. 12. – №. 12. – С. 438.
113. Balkov E. V. et al. EM Induction Frequency Sounding-Estimation of Penetration Depth /Near Surface 2006-12th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2006. – С. cp-14-00014.
114. Baranwal V.C., Sharma S.P. Integrated geophysical studies in the East-Indian geothermal province / PURE AND APPLIED GEOPHYSICS V. 163 (2006) 209-227.
115. Belousov A., Belousova M., Auer A. Walter T. R., Kotenko T. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2021. V. 83(1). P. 1–24.

116. Bessonova E.P., Bortnikova S.B., Gora M.P., Manstein Yu.A., Shevko A.Ya., Panin G.L., Manstein A.K. Geochemical and geo-electrical study of mud pools at the Mutnovsky volcano. (South Kamchatka, Russia): Behavior of elements, structures of feeding channels and a model of origin / *Applied Geochemistry*, 2012, v. 27, Issue 9, pp. 1829-1843.
117. Bortnikova S.P., Bortnikova S.B., Gora M.P., Shevko A.Y., Lesnov F.P., Kiryuhin A.V. Boiling mud pots: origin and hydrogeochemistry (Donnoe and North-Mutnovsky fumarolic fields, Mutnovsky Volcano; south Kamchatka, Russia) / *Proceedings World Geothermal Congress*. – 2010. – C. 2010.
118. Christopher W.A.P.P., De Silva N., Attanayake A.M.A.N.B., Jayasingha P. Characterization of landslides: a vertical electrical sounding approach / *Geoscience Letters*. – 2023. – T. 10. – №. 1. – C. 18.
119. Compaore H.M.M., Sauret É.S.G., Koïta M., Yameogo P.L., Kissou O.J., Lushima Z.D., Mayela T.T. Using VLF-EM, vertical electrical sounding (VES) and pumping test in large-diameter wells to characterize shallow groundwater—A case study of the Karfiguela paddy field in Burkina Faso / *Journal of Applied Geophysics*. – 2023. – C. 105246.
120. Deparis J. 3D Geological modelling using geological and AEM data / 13th SAGA Biennial & 6th AEM conferences, October 2013, p. 103.
121. Díaz Michelena M., Kilian, R., Rivero, M. Á., Fernández Romero, S., Ríos, F., Mesa, J. L., & Oyarzún, A. Magnetometric surveys for the non-invasive surface and subsurface interpretation of volcanic structures in planetary exploration, a case study of several volcanoes in the Iberian peninsula / *Remote Sensing*. – 2022. – T. 14. – №. 9. – C. 2039.
122. Fadillah A. Harijoko, A., Hendrayana, H., Wibowo, H. E., Baud, B., Lachassagne, P., Dörfliger, N. Hydrogeological interpretation using electrical resistivity tomography: methodology and conceptual model in andesitic volcanic context / *GEOMATE Journal*. – 2023. – T. 24. – №. 106. – C. 25-36.
123. Fan Y.Y., Du X., Jacques Z., Tan D.C., Liu J., An Z.H., Chen J.Y., Zheng G.L., Xie T. The electromagnetic phenomena before the M(S)8.0 Wenchuan earthquake / *CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS-CHINESE EDITION* V. 53 (2010) 2887-2898.
124. Finizola A., Ricci T., Deiana R., Barde Cabusson S., Rossi M., Praticelli N., Giocoli, G. Romano A., Delcher E., Suski B., Revil A., Menny P., Di Gangi F., Letort

- J., Peltier, V. Villasante-Marcos A., Douillet G., Avaré G., Lelli M. Adventive hydrothermal circulation on Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) revealed by geophysical and geochemical approaches: Implications for general fluid flow models on volcanoes / *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 196 (2010) 111–119.
125. Gibert D., de Bremond d'Ars, J., Carlus, B., Deroussi, S., Ianigro, J. C., Jessop, D. E., Rosas-Carbajal, M. Observation of the dynamics of hydrothermal activity in La Soufrière of Guadeloupe volcano with joint muography, gravimetry, electrical resistivity tomography, seismic and temperature monitoring / *Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles*. – 2022. – С. 55-73.
126. НАСН DR/800 Инструкция к прибору [Электронный ресурс] / URL:.
127. Hermans T., Vandenbohede A., Lebbe L., Nguyen F. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography / *Geophysics*. – 2012. – Т. 77. – №. 1. – С. B11-B21.
128. Ichiki M. Kaida, T., Nakayama, T., Miura, S., Yamamoto, M., Morita, Y., Uyeshima, M. Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method / *Earth, Planets and Space*. – 2021. – Т. 73. – №. 1. – С. 1-30.
129. Kalacheva E. Taran, Y., Voloshina, E., & Inguaggiato, S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: Geochemistry, solute fluxes and heat output / *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2017. – Т. 346. – С. 10-20.
130. Kiryukhin A. V., Nazhalova I. N., Zhuravlev N. B. Hot water-methane reservoirs at southwest foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka / *Geothermics*. – 2022. – Т. 106. – С. 102552.
131. Kiryukhin A. V. Zhuravlev, N. B., Burnaikin, D. N., Tokarev, I. V. Conceptual numerical modeling of low-temperature nitrogen geothermal systems on the Verkhne-Paratunsky and Paratunsky fields / *Geothermics*. – 2025. – Т. 131. – С. 103341.
132. Kokhanova S., Kucher D., Volynkin S. Geophysical and geochemical studies on an active volcano (Ebeko volcano, Paramushir Island) // *Reliability: Theory and Applications* – том 70 – № 4 – С. 357-360 – 2022
133. Koulakov I., Komzeleva V., Smirnov S. Z., Bortnikova S. B. Magma-fluid interactions beneath Akutan volcano in the Aleutian arc based on the results of local earthquake tomography // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2021. – Т. 126. – №. 3. – С. e2020JB021192.

134. Komori S., Kagiya T., Hoshizumi H., Takakura S., Mimura M. Vertical mapping of hydrothermal fluids and alteration from bulk conductivity: Simple interpretation on the USDP-1 site, Unzen Volcano, SW Japan / *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 198 (2010) 339–347.
135. Ledo J. García-Merino, M., Larnier, H., Slezak, K., Piña-Varas, P., Marcuello, A., Sumita, M. 3D electrical resistivity of Gran Canaria island using magnetotelluric data / *Geothermics*. – 2021. – T. 89. – C. 101945.
136. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. – 2004.
137. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques / *Geophysical Prospecting*, 1996, N44 (3), p. 499–524.
138. Mauri G. Multi-scale analysis of multiparameter geophysical and geochemical data from active volcanic systems / Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in the Earth Sciences Department, Simon Fraser University, 2009.
139. Miller C. A. Christenson, B. W., Byrdina, S., Vandemeulebrouck, J., Brakenrig, T., Britten, K., Epstein, G. Snapshot of a magmatic/hydrothermal system from electrical resistivity tomography and fumarolic composition, Whakaari/White Island, New Zealand / *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2020. – T. 400. – C. 106909.
140. Modin I. N., Skobelev, A. D., Palenov, A. Y., Shirokova, T. P., Kvon, D. A., Sokolova, T. B., Arutyunyan, D. A. Geophysical Survey of a Mud Volcano Chongeleksky / *Engineering and Mining Geophysics* 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-10.
141. Moinfar A., Mallan R.K., Torres-Verdin C., Anger R. Time-lapse variations of multi-component electrical resistivity measurements acquired in high-angle wells / *Petrophysics*, vol. 51, pp. 408-427, 2010.
142. Moroz Y.F., Nurmukhamedov A.G. A deep geoelectric model of the junction zone of the Kurile-Kamchatka and Aleutian Island arcs / *IZVESTIYA-PHYSICS OF THE SOLID EARTH* V. 40 (2004) 502-514.
143. Munoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods / *Surveys in geophysics*. – 2014. – T. 35. – C. 101-122.

144. Nieto I.M., Martín A.F., Blázquez C.S., Aguilera D.G., García P.C., Vasco E.F., & García J.C. Use of 3D electrical resistivity tomography to improve the design of low enthalpy geothermal systems /Geothermics. – 2019. – T. 79. – C. 1-13.
145. Nyabeze P.K. Modelling of ground electromagnetic and electrical resistivity data for characterization of shallow aquifers in the Limpopo province, South Africa / 13th SAGA Biennial & 6th AEM conferences, October 2013, p. 92.
146. Podgorski J.E., Green A.G., Kgotland L., Kinzelbach W.K.H., Kalsheuer T., Auken E., Ngwisanui T. Evidence for a paleo-Okavango delta and overlying megalake from airborne TEM data / 13th SAGA Biennial & 6th AEM conferences, October 2013, p. 102.
147. Revil A. Finizola, A., Johnson, T., Ricci, T., Gresse, M., Delcher, E., Ripepe, M. The thermal plumbing system of Stromboli volcano, Aeolian Islands (Italy) inferred from electrical conductivity and induced polarization tomography /Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2023. – T. 128. – №. 6. – C. e2023JB026475.
148. Sáez Blázquez C., Martín Nieto I., Carrasco J., Carrasco P., Porras D., Maté-González M. Á., González-Aguilera D. Applying Deep Electrical-Resistivity Tomography Techniques for the Exploration of Medium-and Low-Geothermal Energy Resources /Energies. – 2024. – T. 17. – №. 8. – C. 1836.
149. Santilano A., Giodio A., Manzella A., Menghini A., Rizzo E., Romano G. Electromagnetic and DC methods for geothermal exploration in Italy—case studies and future developments / first break. – 2015. – T. 33. – №. 8.
150. Saribudak M. Inner structure of monogenetic Pilot Knob submarine volcano (Austin, Texas) revealed by electrical resistivity tomography and magnetic surveys / Geophysics. – 2023. – T. 88. – №. 5. – C. B207-B220.
151. Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A., Kamenetsky V.S., Bortnikova S.P., Panin G.L., Zelenski M. Trace Elements and Minerals in Fumarolic Sulfur: The Case of Ebeko Volcano, Kuriles Geofluids – 2018
152. Spichak V.V. Geophysical methods of geothermal resources exploration / Разведка и охрана недр. – 2010. – №. 2. – C. 25-29.
153. Spichak V.V. Three-dimensional modeling of magnetotelluric sounding of volcanoes / IZVESTIYA-PHYSICS OF THE SOLID EARTH V. 40 (2004) 760-770.

154. Taran Y., Kalacheva E. Seawater hydrothermal system in the middle of the Kuril Arc: Yankich Island, Ushishir Archipelago / *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2023. – T. 436. – C. 107784.
155. Varekamp J.C. Ouimette A.P., Herman S.W., Flynn K.S., Bermudez A., Delpino D. Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina / *Applied Geochemistry*. – 2009. – T. 24. – №. 2. – C. 208-220.
156. Veselov O. V., Kazakov A. I., Kozlov D. N. Specificity of the products of Tyatya volcano eruption in 1973 / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – T. 946. – №. 1. – C. 012031.
157. Villiers D.P., Webb S., Weiersbye I., Jones M. Induced polarization effect associated with acidic groundwater in Witwatersrand gold mining areas / 13th SAGA Biennial & 6th AEM conferences, October 2013, p. 101.
158. Whaler K. A., Hautot S. The electrical resistivity structure of the crust beneath the northern Main Ethiopian Rift / *AFAR VOLCANIC PROVINCE WITHIN THE EAST AFRICAN RIFT SYSTEM Book Series: Geological Society Special Publication V. 259* (2006) p. 293-305.
159. Yanis M., Ismail N., Abdullah F. Shallow Structure fault and fracture mapping in Jaboi Volcano, Indonesia, using VLF–EM and electrical resistivity methods / *Natural Resources Research*. – 2022. – C. 1-18.
160. Yu G., Strack K.-M., Allegar N. et al. Characterising a geothermal reservoirs using broadband 2-D MT survey in Theistareykir, Iceland: The extended abstracts of the 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, China, 2008. P.385–388.