

На правах рукописи



НУЖДАЕВ ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**СТРОЕНИЕ ЗОНЫ РАЗГРУЗКИ ПАРОГИДРОТЕРМ
ПО МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ (ПАУЖЕТСКО-
КАМБАЛЬНО-КОШЕЛЕВСКИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РАЙОН,
ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Петропавловск-Камчатский – 2025

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН)

Научный руководитель:

Рычагов Сергей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, заведующий лабораторией фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии, г. Москва

Панин Григорий Леонидович, кандидат технических наук, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник, г. Новосибирск

Ведущая организация:

Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск

Защита состоится 23 декабря 2025 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3; факс: (383) 333-25-13, 330-28-07; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/theses/d003-068-03/nuzdaev2025>

Автореферат разослан 17 ноября 2025 г.

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



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Современные гидротермальные системы и геотермальные месторождения представляют повышенный интерес для фундаментальной науки. Их формирование связано с активными геодинамическими зонами Земли, контактами региональных тектонических блоков, глубинными сквозькоровыми разломами, крупными интрузивными телами. В связи с этим возможно изучение их геологической структуры геофизическими методами с получением информации о ярко выраженных аномалиях: индукции магнитного поля, распространения упругих волн, электромагнитного поля, контрастных значений поля силы тяжести.

Использование геотермальных запасов как источника восполняемой «зеленой» энергии является одним из приоритетных направлений в современной энергетической повестке Российской Федерации. Широко известно, что Камчатский край обладает богатейшими геотермальными ресурсами, разработка которых может обеспечить все потребности региона в электрической и тепловой энергии. Эксплуатируемые в настоящее время на полуострове геотермальные месторождения (Паужетское и Мутновское) обеспечивают устойчивую работу ГеоЭС суммарной мощностью 74 МВт, при необходимых Камчатскому краю 500 МВт. На государственном балансе края находятся 16 геотермальных месторождений, запасы которых утверждены в той или иной степени. Исследования глубинного строения гидротермальных систем и зоны разгрузки парогидротерм, в частности, необходимы для решения фундаментальных научных проблем, касающихся взаимодействия магматических источников с приповерхностными и глубинными флюидами, а также, несомненно, найдут свое применение в практических целях разведки геотермальных месторождений и продуктивном использовании тепла Земли.

Объектами исследования являются современные гидротермальные системы, геотермальные месторождения и термальные поля (термоаномалии) одного из крупнейших на Камчатке Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района.

Предмет исследования: физические величины, характеризующие геологическую среду (индукция магнитного поля, электрическое сопротивление, поле силы тяжести, скорость распространения упругих волн, температура).

Цель работы: выявление особенностей строения зоны разгрузки парогидротерм в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном районе Южной Камчатки на основании магниторазведочных и других геофизических исследований.

Задачи исследования:

1. В ходе экспедиционных работ получить данные о геологическом строении Паужетской, Камбальной и Кошелевской гидротермальных систем

с помощью детального изучения зоны разгрузки парогидротерм геофизическими методами.

2. Проанализировать полученные материалы по каждому геофизическому методу и выполнить комплексную обработку данных для уменьшения неоднозначности интерпретации результатов.

3. Выявить геологические структуры, контролирующие тепловое и водное питание гидротермальных систем Паужетско-Камбально-Кошелевского района.

4. Создать концептуальную модель строения зоны разгрузки парогидротерм и более глубоких горизонтов Паужетской, Камбальной и Кошелевской гидротермальных систем.

Методы исследования и фактический материал.

Геофизические исследования выполнены следующими методами: магниторазведка, гравиразведка, электроразведка (вертикальное электрическое зондирование) и микросейсмическое зондирование. Для каждого метода использовалась современная аппаратура и программное обеспечение обработки данных. Автор участвовал в полевых работах на всех объектах исследования в составе лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН с 2007 по 2024 гг. При интерпретации полученных данных учитывались все собранные материалы поисково-разведочных работ: бурения скважин, геофизических, геологических и гидрогеологических съемок.

Научная новизна:

1. Впервые для гидротермальных систем Камчатки построены площадные карты индукции магнитного поля ΔT_a с использованием современных высокочувствительных магнитометров со встроенной спутниковой привязкой данных.

2. На основании магнитометрических исследований на гидротермальных системах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района установлены геологические особенности строения зоны разгрузки парогидротерм, в том числе ранее не изученного наземными геофизическими методами Камбального вулканического хребта.

3. В результате анализа полученных данных и обобщения геологической информации по объектам исследований созданы концептуальные модели строения зоны разгрузки Паужетских, Камбальных и Кошелевских парогидротерм.

4. Определены геологические структуры, контролирующие потоки термальных вод в верхних горизонтах земной коры. Показаны принципиальные различия в строении зон разгрузки парогидротерм трех гидротермальных систем Камчатки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Изучение современных гидротермальных систем с целью эксплуатации геотермальной восполняемой «зеленой» энергии – это ярко выраженное научно-практическое направление в современной энергетической повестке во всем мире. Российская Федерация обладает огромными геотермальными

ресурсами, по возможности, использования которых Камчатский край занимает первое место. Решение вопросов строения гидротермальной системы, определение источников водного и теплового питания, границ тектонических блоков и секущих разломных зон, областей циркуляции термальных вод – имеют большую научную и практическую значимость. Современные комплексные геолого-геофизические исследования строения зоны разгрузки парогидротерм необходимы для построения верифицированной модели структуры гидротермальной системы и последующей рациональной эксплуатации геотермального месторождения.

Защищаемые научные результаты:

1. Зона разгрузки парогидротерм Паужетского геотермального месторождения приурочена к приподнятым тектоническим и тектоно-магматическим блокам и характеризуется слоисто-блоковой структурой. По данным площадной магнитной съемки на месторождении выделяются Западный и Восточный участки. Тектоно-магматические блоки и контактовые зоны субвулканических тел Восточного участка месторождения контролируют подъем термальных вод. На Западном участке происходит латеральное растекание гидротерм верхнего водоносного горизонта по системе радиально-концентрических трещин. Восточный участок перспективен на поиск высокотемпературных глубинных термальных вод, Западный – на выделение близповерхностных геотермальных резервуаров.

2. В результате магнитометрических исследований установлено, что разгрузка парогидротерм Нижне-Кошелевского геотермального месторождения контролируется системой изометричных и линейных зон аргиллизации горных пород. Непосредственно под Нижне-Кошелевской термоаномалией выделена область аргиллизации пород, насыщенная парогазовой смесью и распространяющаяся на глубину более 250 м. Определены участки скрытой разгрузки термальных вод, приуроченные к линейным разрывным тектоническим нарушениям. Зона разгрузки парогидротерм связана субвертикальными каналами с глубинным источником газо-гидротермальных флюидов.

3. Южная группа термальных полей Камбального вулканического хребта характеризуется пониженным модулем индукции магнитного поля T по сравнению с Паужетским и Нижне-Кошелевским геотермальными месторождениями, что свидетельствует о более интенсивном изменении горных пород хребта гидротермально-метасоматическими процессами. Каждое термальное поле южной группы образовано в различных геологических условиях: Дальнее – в зоне линейного тектонического нарушения, Центральное – в эродированном кратере палеовулкана Термальный, Ближнее – в контактовой зоне экструзии кислого состава. По комплексным геофизическим данным установлена гидродинамическая связь Южно-Камбального Дальнего и Южно-Камбального Центрального термальных полей.

Личный вклад.

Автор принимал активное участие в полевых геофизических работах на всех гидротермальных системах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района. Руководил магнитометрическим направлением: выполнял полевую съемку, обработку данных, анализ и интерпретацию полученных результатов. Проводил полевые измерения на объектах исследования методами микросейсмического зондирования, вертикального электрического зондирования. Участвовал в построении гравимагнитных разрезов, а также в создании геолого-геофизических моделей строения парогидротерм Паужетской, Камбальной и Кошелевской гидротермальных систем, представленных в работе.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы были представлены автором в виде научных докладов на 12 конференциях российского и международного уровня: на III Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2013); VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов) (Новосибирск, 2014); IX научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича (Екатеринбург, 2017); XII Международной школе по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (Петропавловск-Камчатский, 2022); региональных молодежных конференциях «Природная среда Камчатки» (Петропавловск-Камчатский, 2011, 2014); конференциях, посвященных Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (Петропавловск-Камчатский, 2012, 2017, 2019, 2022); Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Петропавловск-Камчатский, 2023); Международном геотермальном конгрессе World Geothermal Congress (Рейкьявик, 2021).

По теме диссертации опубликовано 9 статей в журналах «Геология и геофизика», «Вулканология и сейсмология», «Доклады АН», «Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле», «Тихоокеанская геология», входящих в список изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа изложена на 132 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 137 наименований. Содержит 48 рисунков.

Благодарности.

Автор выражает благодарность научному руководителю – заведующему лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН д.г.-м.н. С.Н. Рычагову за внимание, поддержку и помощь в выполнении работы.

Автор искренне признателен коллегам-геофизикам С.О. Феофилактову, Ю.Ю. Букатову, И.Ф. Абкадырову, Д.К. Денисову, В.А. Логинову за совместные полевые исследования и обработку полученного материала.

Автор благодарит сотрудников ИВиС ДВО РАН А.А. Нуждаева, Е.С. Житову, О.А. Гирину, А.Ф. Сашенкову и директора ИВиС ДВО РАН А.Ю. Озерова за помощь и ценные советы, Е.Г. Калачеву, Ю.А. Тарана, А.А. Долгую за содействие в написании работы, Р.А. Кузнецова, О.В. Кравченко, А.В. Сокоренко за помощь в полевых работах.

Отдельная благодарность сотрудникам Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова: М.С. Чернову, В.В. Шаниной, И.Е. Большакову, А.Б. Ермолинскому за помощь в проведении полевых исследований и ценные советы.

Особая благодарность Е.А. Нуждаевой за всестороннюю поддержку на всех этапах написания работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского научного фонда под руководством автора (№ 22-27-00019; № 24-27-20083).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние геолого-геофизических исследований гидротермальных систем мира и Камчатки

Гидротермальными системами принято считать термоаномалии в верхней части земной коры областей современного вулканизма, приуроченные к определенным геологическим структурам и характеризующиеся поверхностной гидротермальной активностью. Формирование гидротермальных систем связано с зонами контакта тектонических блоков, глубинными разломами, крупными интрузивными телами. В связи с этим возможно изучение их геологической структуры геофизическими методами на километры в глубину, в виду ярко выраженных аномалий: высоких значений поля силы тяжести, магнитного поля, электропроводности, распространения упругих волн.

В нашей стране и за рубежом геофизические методы широко применяются в геотермальных исследованиях для решения, в первую очередь, структурных задач. Магнитометрические, гравиметрические, сейсморазведочные и электроразведочные методы хорошо зарекомендовали себя в изучении глубинного строения гидротермальных систем.

В работе дана характеристика наиболее изученных геотермальных месторождений Камчатки, относящихся к различным типам: высокотемпературные (температура в недрах более 200°C) Мутновское, Больше-Банное, Нижне-Кошелевское; среднетемпературное (температура в недрах от 100 до 200°C) Паужетское; низкотемпературное (температура в недрах менее 100°C) Паратунское.

Глава 2. Геологическое строение Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района и характеристика объектов исследований

В работе приводится подробное описание трех гидротермальных систем Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района, на которых выполнялись геофизические исследования (рис. 1).

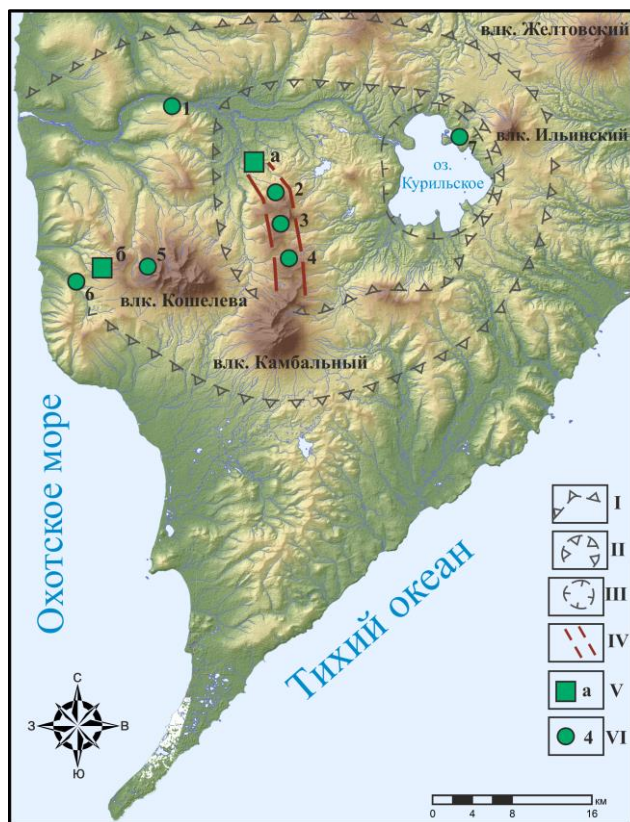


Рисунок 1. Основные структуры Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района Южной Камчатки [Нуждаев и др., 2024]: I – Паужетская вулcano-тектоническая структура типа аккумулятивно-сводового поднятия [Долгоживущий ..., 1980]; II – Паужетская вулcano-тектоническая депрессия; III – кальдера Курильского озера; IV – предполагаемая зона теплового питания термоаномалий Камбального вулканического хребта; V – разведанные геотермальные месторождения (а – Паужетское, б – Нижне-Кошелевское); VI – крупные термопроявления (1 – Первые Горячие Ключи, 2 – Северо-Камбальное, 3 – Центрально-Камбальное, 4 – Южно-Камбальное, 5 – Верхне-Кошелевское, 6 – Сивучинское, 7 – Теплая бухта).

Паужетская гидротермальная система – наиболее изученный объект в этом районе. В 1960-х гг. были проведены комплексные геолого-геофизические исследования, результатом которых стало выделение Паужетского геотермального месторождения; с 1967 г. оно успешно эксплуатируется. Паужетские термальные источники являются примером перегретых хлоридно-натриевых вод. На глубине 400 м температура воды достигает 190°C. На поверхность выходят слабощелочные (pH = 8) хлоридно-натриевые воды с температурой 100°C, с содержанием CO₂. Основные термальные разгрузки сосредоточены на Верхне- и Восточно-Паужетском полях (рис. 2).

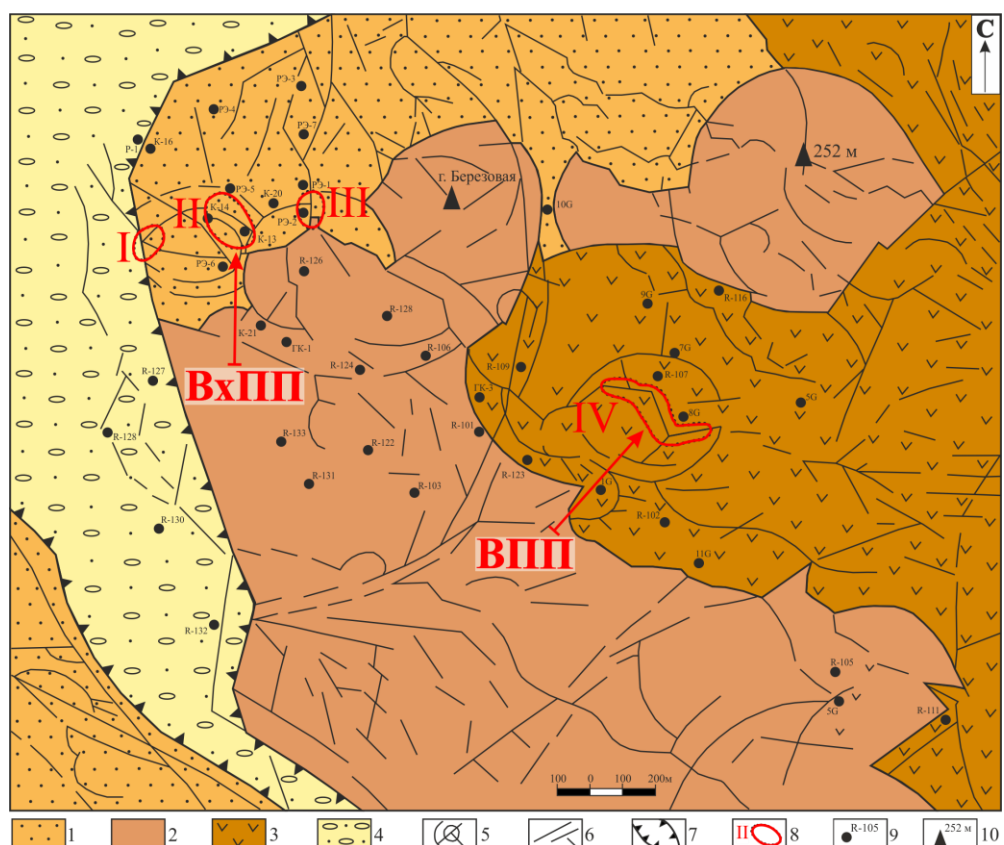


Рисунок 2. Схематическая геологическая карта Паужетской гидротермальной системы (составлена по обобщенным данным поисково-разведочных работ и тематических научных исследований) [Структура ..., 1993]. 1 – туффы и туфы верхнепаужетской подбиты верхнечетвертичного возраста; 2 – лаво-экструзивный комплекс пород кислого состава среднечетвертичного возраста; 3 – андезиты и андезибазальты среднечетвертичного возраста; 4 – аллювиальные валунно-галечные отложения; 5 – кольцевые тектонические нарушения, околонтруивающие приподнятые блоки пород и контролирующие положение термальных полей; 6 – система линейных тектонических нарушений; 7 – Паужетский грабен верхнечетвертичного возраста; 8 – термальные поля: I – Южно-Паужетское, II – Верхне-Паужетское, III – Нижне-Паужетское, IV – Восточно-Паужетское; 9 – скважины, 10 – отметки высот.

Кошелевская гидротермальная система включает в себя два очень крупных термальных поля, расположенных на склонах вулкана Кошелева. Их также уместно называть Верхне-Кошелевская и Нижне-Кошелевская термоаномалии (т/а). В районе Нижне-Кошелевской термоаномалии в 1975-1984 гг. разведано геотермальное месторождение, основной особенностью которого является наличие мощной зоны перегретого пара. Термальные разгрузки – от слабокислых до слабощелочных, сульфатные и гидрокарбонатно-сульфатные аммониевые. Температуры грунтов не превышают 105°C, парогазовые струи достигают 130-158°C (рис. 3).

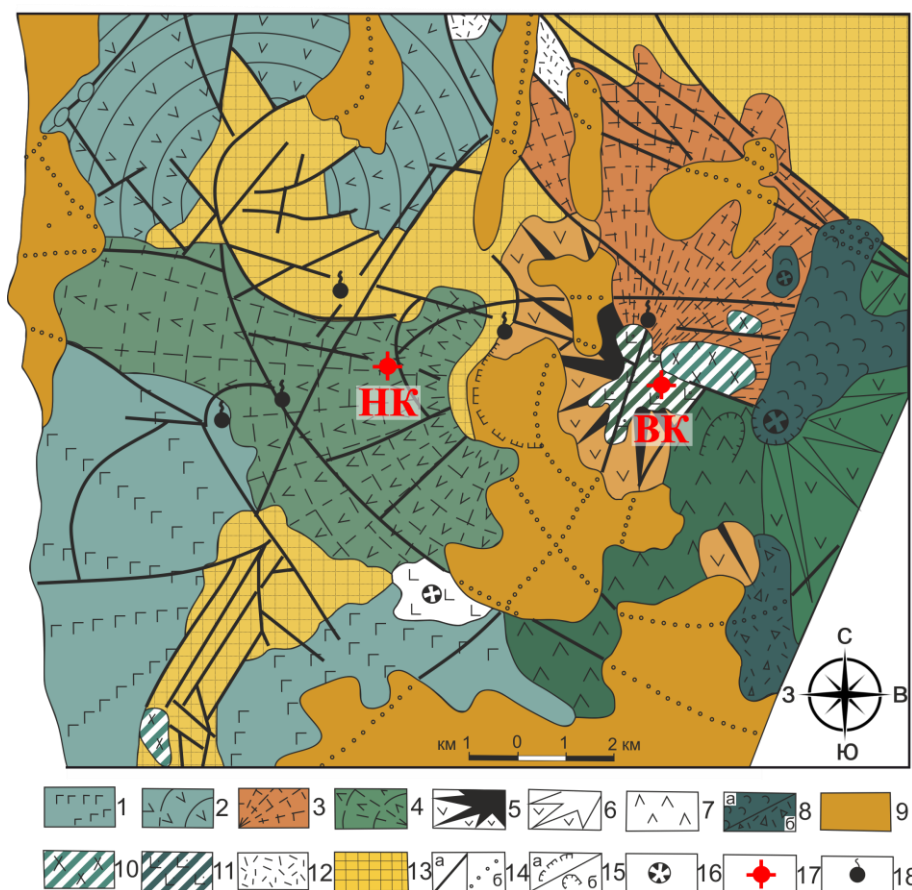


Рисунок 3. Схематическая геологическая карта Кошелевского вулканического массива [Вакин и др., 1976] с изменениями. 1-2 – эффузивные и пирокластические отложения нижнечетвертичных вулканов: 1 – вулкан Дед и Баба ($\alpha\beta Q_I$); 2 – вулкан Третья Речка ($\alpha\beta Q_{II}$); 3-8 – эффузивные и пирокластические отложения Кошелевского вулканического массива: 3 – вулкан Древний (αQ_{II}); 4 – вулкан Западный (αQ_{III}^1); 5 – вулкан Валентин (αQ_{III}^2); 6 – вулкан Восточный (βQ_{III-IV}); 7 – вулкан Центральный ($\alpha\beta Q_{III-IV}$); 8 – образования Активного кратера: а) лавовые потоки, б) отложения направленного взрыва; 9 – рыхлые отложения различного генезиса ($Q_{II-Q_{IV}}$); 10 – экструзии голоценового возраста; 11 – субвулканические интрузии долеритов (βQ_{III-IV}); 12 – предположительно туфы кислого состава верхнепаужетской подсвиты; 13 – дочетвертичные эффузивы (αN^1-N^2); 14 – разрывные нарушения: а) установленные, б) предполагаемые; 15 – а) кальдеры; б) эродированные кратеры и воронки взрывов; 16 – кратеры эффузивных и шлаковых конусов; 17 – основные термоаномалии (т/а): НК – Нижне-Кошелевская; ВК – Верхне-Кошелевская; 18 – локальные разгрузки термальных вод.

Камбальная гидротермальная система расположена вдоль осевой зоны Камбального вулканического хребта и объединяет три группы термальных полей: Северо-, Центральную и Южно-Камбальную. В настоящее время это все еще малоизученный объект. Выполнены первые наземные геофизические исследования на площади Южной группы, которая включает Ближнее, Центральное и Дальнее термальные поля (рис. 4). Термальные воды характеризуются высокими содержаниями аммония и имеют температуру до 100°C , в составе газа преобладают азот, сероводород, углекислый газ с температурой до 120°C .

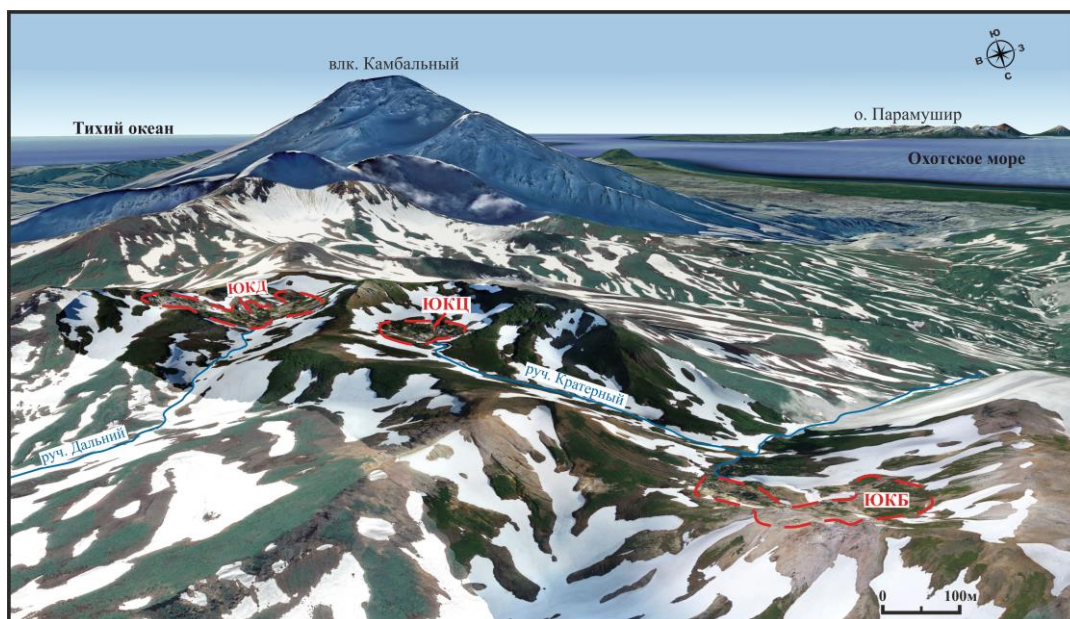


Рисунок 4. Схема расположения термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта, вид на юг. Красным пунктиром показаны границы термальных полей по 20°C изотерме: ЮКБ – Южно-Камбальное Ближнее, ЮКЦ – Южно-Камбальное Центральное, ЮКД – Южно-Камбальное Дальнее.

Глава 3. Аппаратура и методика геофизических исследований

Основным геофизическим методом исследования в работе является площадная магниторазведка. Использовались два вида магнитометров (приборов, предназначенных для измерения модуля вектора магнитной индукции): ММП-203 (СССР) – в начале работ и GEM GSM-19W (Канада) – в основной части. Съёмка выполнялась как в ходе пешеходных маршрутов (в районе Южно-Камбальной группы), так и с использованием снегоходной техники для буксировки оператора при наличии снежного покрова (район Нижне-Кошелевского и Паужетского месторождений). На первом этапе геофизических исследований гидротермальных систем применение магниторазведки позволило определить аномальные области, связанные с участками гидротермально измененных пород, крупными структурными неоднородностями, геологическими телами, тектоническими нарушениями. Далее, для понимания природы аномалообразующих объектов и уменьшения неоднозначности при интерпретации результатов, на выделенных участках с аномальными значениями индукции магнитного поля дополнительно проводились гравиметрические исследования (Scintrex CG-5 Autograv (Канада)) и вертикальные электрические зондирования (генератор АСТРА-100 (Россия), измеритель МЭРИ-24 (Россия)). Применение метода микросейсмического зондирования (сейсмометров Guralp CMG-6TD (Великобритания)) в районе Нижне-Кошелевского геотермального месторождения в комплексе с магнитной съёмкой позволило охарактеризовать распространение аномальных областей как по площади, так и на глубину более 3 км, а также выделить зоны восходящего парогазового потока.

Глава 4. Фактический материал, анализ и интерпретация геофизических данных

Паужетское геотермальное месторождение

По результатам площадной магнитной съемки, с учетом суточных вариаций и за вычетом медианного нормального значения индукции магнитного поля, построена карта аномального магнитного поля ΔT_a для Паужетского геотермального месторождения (рис. 5). На карте выделяются две крупные области: Западная и Восточная. Западная область характеризуется спокойным слабо отрицательным магнитным полем с интенсивностью аномалий от -400 до 400 нТл. Восточная область отличается широким интервалом значений ΔT_a (от -900 до 1100 нТл) и дробным характером аномальных участков – выделяется множество мелких изометричных в плане отрицательных аномалий. Западная и Восточная области отличаются по геологическому строению. Западная область расположена в поле развития вулканогенно-осадочных пород паужетской свиты и лав дацитового состава и распространяется на структуру Паужетского грабена. Восточная область перекрывает, в основном, андезиты и андезибазальты Камбального хребта. По данным бурения разведочных скважин (R-102, R-107 и др.), на этом участке месторождения на небольшой глубине (десятки и первые сотни метров) залегают субпластовые и субвертикальные тела дацитов, риолитов и андезибазальтов. Восточная область карты характеризуется наличием большого числа локальных изометричной формы отрицательных аномалий ΔT_a , к одной из которых приурочено Восточно-Паужетское термальное поле (рис. 5). Однако, в центральной части термального поля выделяется положительная магнитная аномалия со значениями ΔT_a до 690 нТл. Положительная магнитная аномалия в центре термального поля может свидетельствовать в пользу наличия на небольшой глубине субинтрузивного тела основного или среднего состава, кровля которого приближена к дневной поверхности. Проведено гравимагнитное моделирование с привлечением литологических данных, на основании которого получены следующие характеристики аномалообразующего объекта: плотность = 2.4 г/см³, магнитная восприимчивость = 0.037 СИ, остаточная намагниченность = 1.9 А/м, глубина до верхней кромки тела около 30 м, ширина в пределах 50 м, мощность не превышает 200 м.

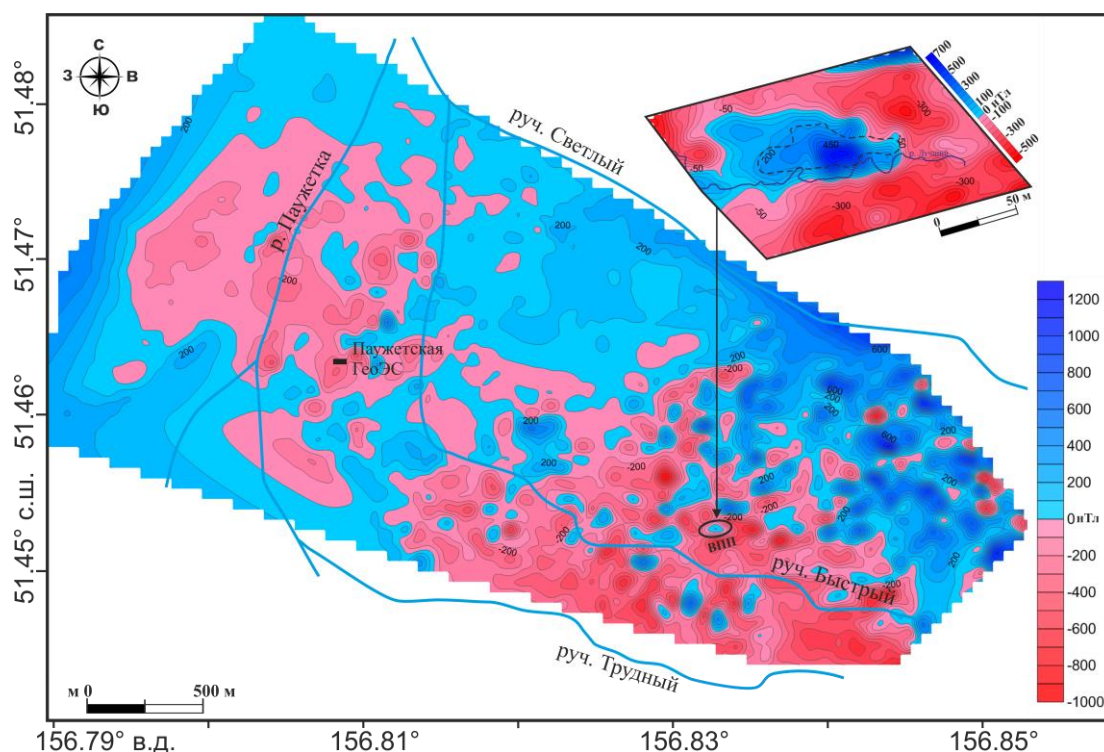


Рисунок 5. Карта аномалий магнитного поля ΔT_a для Паужетского месторождения [Нуждаев и др., 2023]. На врезке – аномалия индукции магнитного поля для Восточно-Паужетского термального поля. Пунктирной линией показана граница термального поля по 20°C изотерме.

Нижне-Кошелевское месторождение парогидротерм

По результатам площадной магнитной съемки построена карта аномалий магнитного поля ΔT_a Нижне-Кошелевского месторождения (рис. 6а). Карта характеризуется контрастными значениями ΔT_a , от -2200 до 2000 нТл. В центральной части площади выделяются отрицательные аномалии: имеющие относительно изометричную форму и размеры в поперечнике ≥ 300 -500 м, (Северная (С), Центральная (Ц) и Южная (Ю)), а также линейные, вытянутые до 1-3 км. Район Северной отрицательной магнитной аномалии может быть перспективным для поиска сухого пара или перегретых гидротерм. Центральная аномалия распространяется в области разгрузки современных парогидротерм, где происходит активная аргиллизация пород и окисление магнитных фракций; Южная располагается по простиранию долины руч. Прямой. Этот ручей трассирует протяженное линейное разрывное тектоническое нарушение, выделенное ранее по материалам аэромагнитных работ. Сопряженная с этим нарушением отрицательная магнитная аномалия интерпретируется выщелачиванием из пород ферромагнитных минералов в процессе палеогидротермальной деятельности: здесь по данным бурения установлены пропилиты и вторичные кварциты в широком интервале глубин [Поздеев, Нажалова, 2008]. Все отрицательные аномалии формируют единое неоднородное поле на фоне положительных значений ΔT_a , характеризующих неизменные горные породы Кошелевского вулканического массива.

Проведено сопоставление результатов магнитной съемки с разрезом, полученным методом микросейсмического зондирования (рис. 6б). По данным ММЗ в районе Нижне-Кошелевской т/а выделяются три области с высокой относительной интенсивностью микросейсмических сигналов. Первая область повышенной интенсивности сигналов совпадает с Северной магнитной аномалией, распространяется на глубину более 1 км и соответствует разрывному тектоническому нарушению. Вторая область расположена непосредственно под Нижне-Кошелевской т/а, распространяется до глубины 250-300 м и соответствует насыщенным парогазовой смесью аргиллизированным породам (зоне гипергенеза современной гидротермальной системы). Южнее выделяется область, распространяющаяся на глубину более 3 км. Она, вероятнее всего, представляет собой трещинно-брекчиевую структуру в виде субвертикального канала, по которому происходит подъем парогазового теплоносителя к дневной поверхности.

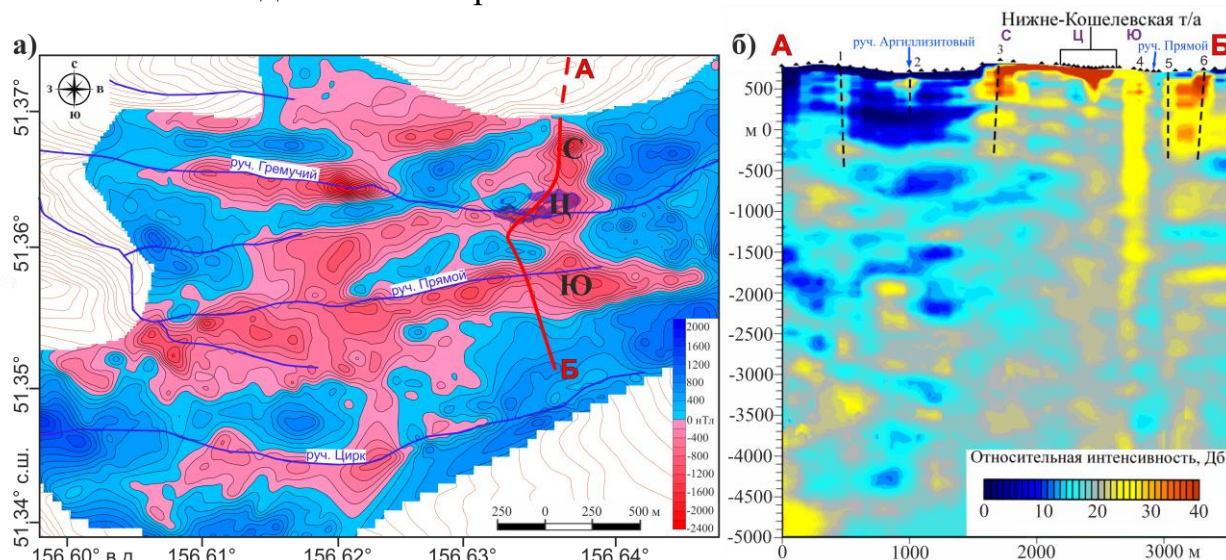


Рисунок 6. Результаты геофизических исследований на Нижне-Кошелевском геотермальном месторождении. **а)** Карта аномалий магнитного поля ΔT_a [Нуждаев и др., 2023]. Условные обозначения аномалий: Северная (С), Центральная (Ц) и Южная (Ю). Микросейсмический профиль АБ, начало профиля выходит за пределы карты; **б)** Разрез по профилю АБ, отражающий глубинное строение Нижне-Кошелевского геотермального месторождения по данным микросейсмического зондирования [Абкадыров и др., 2010; Рычагов и др., 2018]. 1-6 – основные тектонические и гидрогеологические структуры по данным интерпретации ММЗ и в сопоставлении с материалами поисково-разведочных работ: 1 – разлом руч. Аргиллизитовый; 2 – скрытое малоглубинное тектоническое нарушение; 3 – разлом Верхний Сдвинутый, 4 – древняя и современная зона тектонических нарушений по руч. Прямой; 5, 6 – тектоническая зона, трассируемая руч. Цирк.

Южная группа термальных полей Камбального вулканического хребта

На этой площади впервые проведены наземные пешеходные геофизические исследования и получены первые результаты. Построена детальная карта распределения аномального магнитного поля ΔT_a для территории Южно-Камбальной группы термальных полей (рис. 7а). Среднее наблюдаемое значение индукции магнитного поля составляет 50303 нТл. В

целом, термальные поля этой группы характеризуются пониженным модулем магнитной индукции по сравнению с Паужетским (50897 нТл) и Нижне-Кошелевским (51013 нТл) геотермальными месторождениями [Нуждаев и др., 2023]. Это свидетельствует о более интенсивном изменении горных пород Камбального хребта гидротермально-метасоматическими процессами, по-видимому, в результате более длительного воздействия конвективного теплового потока. Также выявлен необычный характер взаимосвязи аномалий магнитного и температурного полей: ЮКД расположено в знакопеременной зоне магнитного поля, ЮКЦ – на границе между отрицательной и положительной аномалиями, ЮКБ – в пределах относительно невысоких значений ΔT_a . Таким образом, горячие участки и основные разгрузки термальных вод приурочены к средним значениям ΔT_a , в то время как наиболее типичной является прямая связь температурного поля с отрицательными аномалиями ΔT_a вследствие аргиллизации пород и разрушения ферромагнитных минералов [Феофилактов и др., 2017]. При этом, термальные поля ЮКЦ и ЮКД пространственно тяготеют к крупной отрицательной магнитной аномалии ΔT_a , что может свидетельствовать об их приуроченности к одной геологической структуре, проницаемой для гидротермального флюида.

Проведено сопоставление данных магниторазведки и результатов вертикальных электрических зондирований по профилю Д-Е, пересекающему все термальные поля. На графике (рис. 7б) распределения индукции магнитного поля ΔT_a видно, что для ЮКБ характерны слабоположительные значения, далее, за границей 20°C изотермы, значения ΔT_a опускаются ниже 600 нТл с увеличением электрического сопротивления в приповерхностном слое. Дипольная аномалия с максимальными и минимальными значениями ΔT_a выделена для долины руч. Кратерный. По-видимому, здесь проходит структурная граница между гидротермально-метасоматическими породами и неизменными или слабо измененными андезитами. Для ЮКЦ характерны слабо отрицательные значения ΔT_a , переходящие в положительные значения ΔT_a к участку ЮКД. На разрезе кажущегося сопротивления (рис. 7в) отчетливо видна единая зона со значениями от 0.6 до 3 Ом·м, по-видимому, являющаяся зоной циркуляции минерализованных термальных вод. Эти данные согласуются с результатами магнитометрических исследований и свидетельствуют о структурной и гидродинамической связи двух термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта.

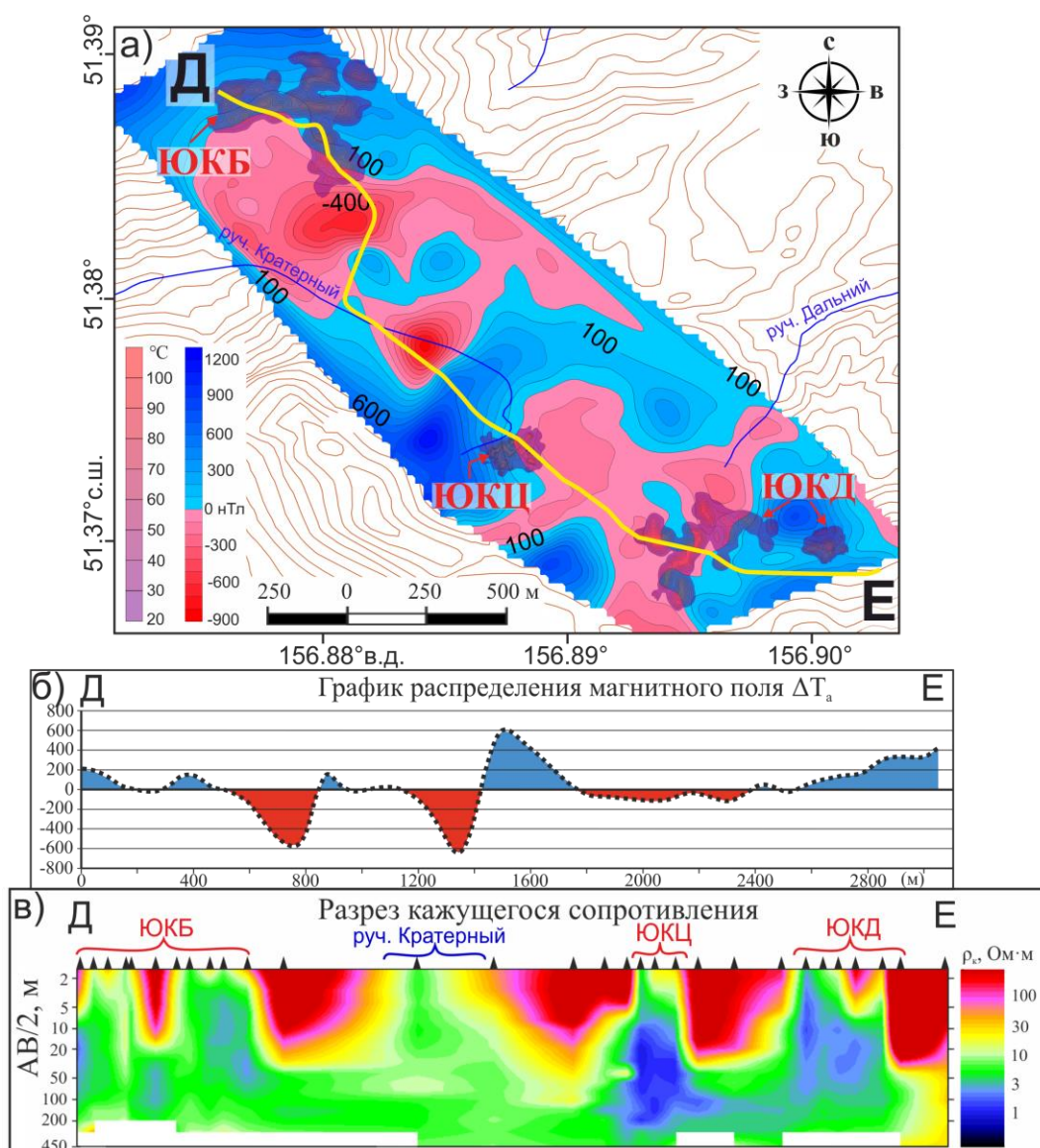


Рисунок 7. Результаты геофизических исследований Южно-Камбальной группы термальных полей [Нуждаев и др., 2024]. **а)** Карта аномалий магнитного поля ΔT_a для группы Южно-Камбальных термальных полей; **б)** График распределения значений ΔT_a по профилю Д-Е; **в)** Разрез кажущегося сопротивления по данным ВЭЗ по профилю Д-Е.

Глава 5. Геолого-геофизическое моделирование строения зоны разгрузки парогидротерм

Паужетское геотермальное месторождение

Зоны разгрузки парогидротерм на западном и восточном участках Паужетского геотермального месторождения существенно отличаются по своему строению.

Восточный участок месторождения детально изучен в ходе комплексных геолого-геофизических исследований района Восточно-Паужетского термального поля. На основе полученных результатов построена концептуальная модель структуры и условий образования зоны разгрузки парогидротерм в этом районе (**рис. 8**). Модель базируется на выделении субвулканического (субинтрузивного?) тела основного или

среднего состава, кровля которого находится на глубине в первые десятки метров от уровня современного рельефа. Тело прорывает туфы верхнепаужетской подсвиты и внедряется в подошву лавового комплекса андезитов среднечетвертичного возраста Камбального вулканического хребта. Такие тела характерны для всех этапов развития Камбального хребта. Вследствие внедрения субвулканического тела во вмещающие породы, в его апикальной части и в перекрывающих андезитах образовалась система блоков с контрастными физико-механическими свойствами 1) разуплотненные трещиноватые и 2) массивные, относительно непроницаемые для газо-водных флюидов. Маловероятно, что внедрение этого тела произошло на современном этапе развития гидротермальной системы, поскольку магматизм на данной территории завершился в плейстоцене и раннем голоцене [Белоусов, 1978; Долгоживущий ..., 1980]. Следовательно, субвулканическое тело может играть роль природного деформографа и проводника глубинных флюидов, оказывающих влияние на гидротермальную систему.

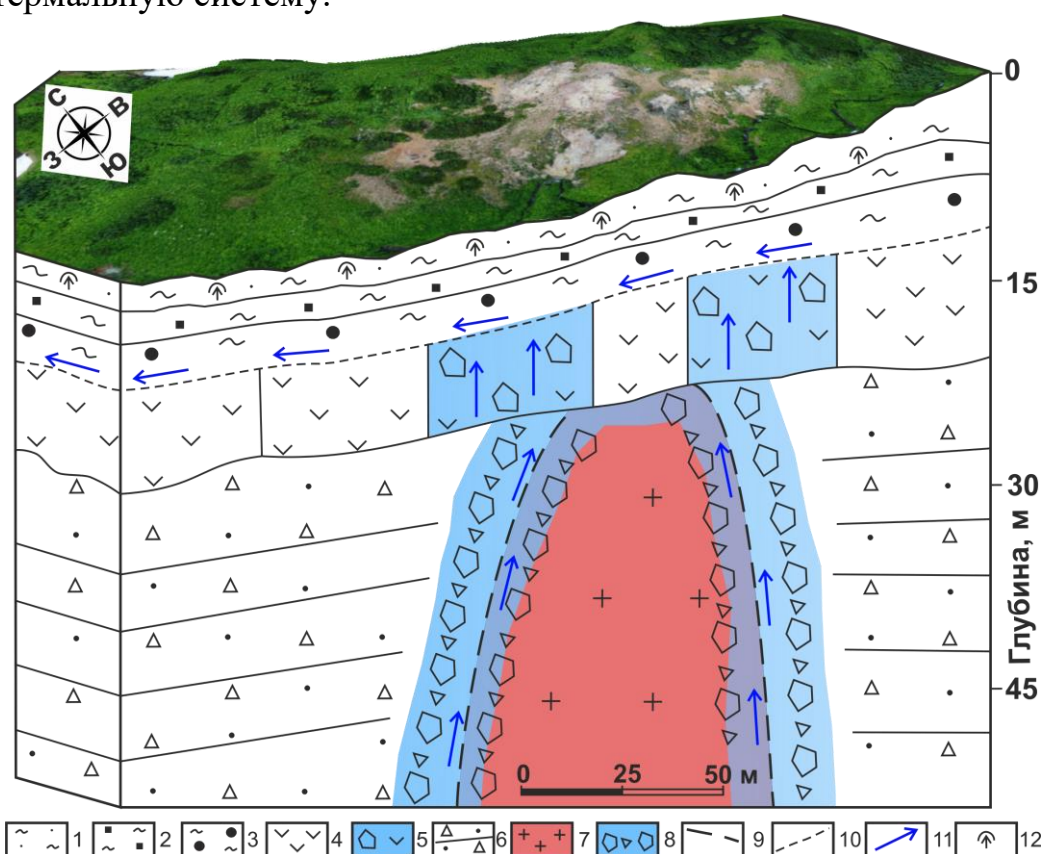


Рисунок 8. Концептуальная модель структуры зоны разгрузки парогидротерм в районе ВПП [Феофилактов и др., 2017]. 1 – горизонт гидротермальных глин зоны сернокислотного выщелачивания; 2 – горизонт влагонасыщенных глин; 3 – горизонт «сухих» глин; 4 – лавы андезитов; 5 – лавы андезитов, интенсивно трещиноватые и брекчированные; 6 – туфы и туффиты верхнепаужетской подсвиты; 7 – субвулканические породы; 8 – брекчии в эндо-экзоконтактовой зоне субвулканического тела; 9 – условная граница апикальной части субвулканического тела; 10 – подошва толщи гидротермальных глин – зона растекания смешанных термальных вод; 11 – восходящие газо-водные флюиды; 12 – зона интенсивного испарения влаги. Объемная модель поверхности термального поля построена на основе ортофотоплана М.С. Чернова.

Западный участок месторождения включает зону разгрузки парогидротерм в районе Верхне-, Нижне- и Южно-Паужетского термальных полей. Здесь в температурном, геоэлектрическом, магнитном и гравиметрическом полях выделена изометричная концентрически-зональная структура, которая пространственно коррелирует с приподнятым тектоническим блоком. Центральная часть этого блока характеризуется разгрузкой парогидротерм на дневной поверхности и высокоградиентными геофизическими аномалиями.

Нижне-Кошелевское месторождение парогидротерм

В ходе комплексных геолого-геофизических и гидрогеохимических исследований получены новые данные о строении Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения (рис. 9). Непосредственно под Нижне-Кошелевской термоаномалией выделена зона гипергенеза гидротермальной системы – изометричная в плане и распространяющаяся на глубину $\geq 250\text{--}300$ м в форме неправильной чаши область разуплотненных интенсивно аргиллизированных пород, насыщенных парогазовой смесью [Рычагов и др., 2018]. Установлено, что зона гипергенеза значительно шире, чем размеры Нижне-Кошелевской термоаномалии на дневной поверхности: выходит за пределы геоморфологических границ разгрузки парогидротерм и оконтуривающей ее 20°C изотермы [Нуждаев, Феофилактов, 2013]. Зона гипергенеза связана с источником тепла субвертикальным каналом, объединяющимся с еще более ярко выраженной областью повышенной проницаемости для парогазового флюида мощностью до 300–350 м, погружающейся на глубину > 5 км. В приповерхностных горизонтах гидротермальной системы выделяются отдельные субвертикальные каналы повышенной проницаемости пород, по которым парогазовая смесь и гидротермальные растворы разгружаются в районе Нижне-Кошелевской термоаномалии. В недрах месторождения также выделены элементы палеогидротермальной системы: относительно холодные блоки пород, сложенные пропилитами и вторичными кварцитами с эпитермальной рудной минерализацией [Поздеев, Нажалова, 2008]. Блоки пород, принадлежащие современной и палеогидротермальной системам, разделены крутопадающими разрывными тектоническими нарушениями [Писарева, 1987]. Многофазная субвулканическая интрузия является крупной физической неоднородностью и источником тектонических деформаций в структуре гидротермальной системы.

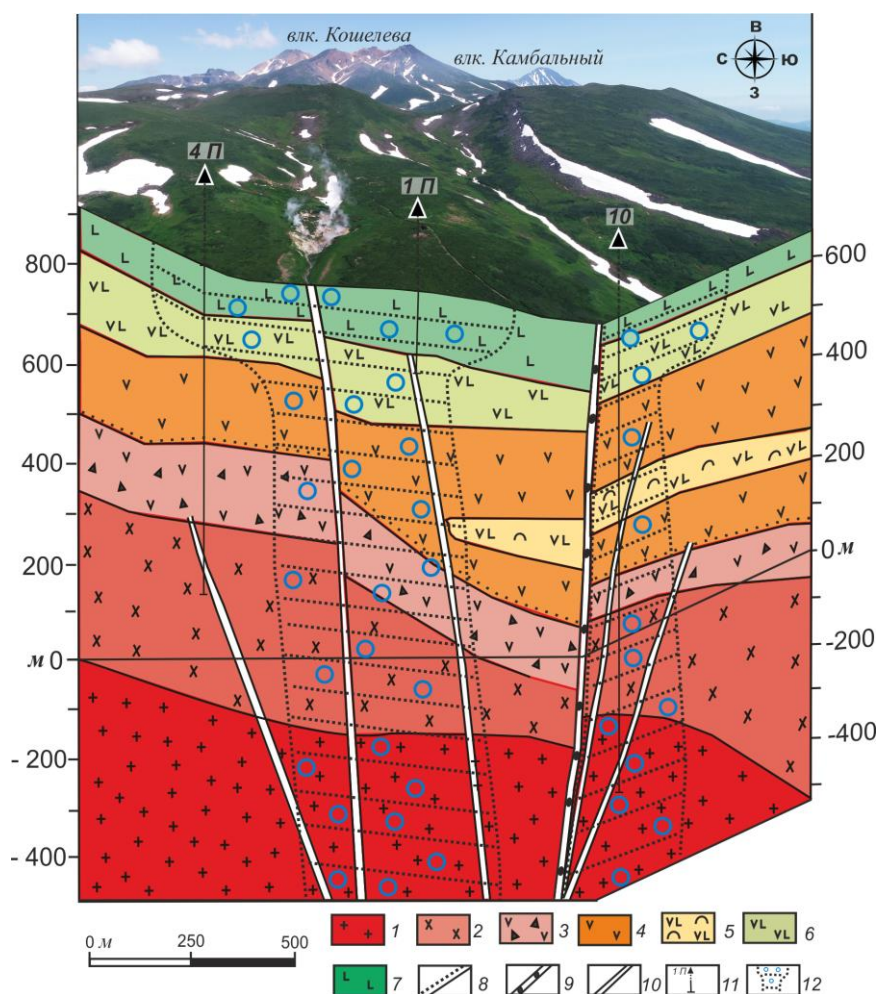


Рисунок 9. Концептуальная модель строения Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения. Использованы материалы поисково-разведочных работ [Писарева, 1987]. 1 – диориты; 2 – диоритовые порфиры; 3 – субинтрузивные ксенобрекчии; 4 – андезиты; 5 – туфы андезибазальтов; 6 – лавы андезибазальтов; 7 – лавы дациандезитов; 8 – граница интрузивно-субвулканического комплекса; 9 – закольматированные более древние разломы; 10 – открытые разломы и трещины; 11 – урочные скважины и их номера; 12 – зоны повышенной трещинно-поровой проницаемости для парагазового флюида.

Южная группа термальных полей Камбального вулканического хребта

На основе комплексных геофизических исследований получены первые данные о строении термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта. Показано, что термальные поля локализуются в геологических структурах, характеризующихся высокой степенью пористости и трещиноватости гидротермально измененных пород (**рис. 10**).

Южно-Камбальное Дальнее термальное поле приурочено к линейному тектоническому нарушению, вдоль которого сосредоточены выходы наиболее мощных парагазовых струй и крупные кипящие водные котлы. Тектоническое нарушение также проявлено аномалиями магнитного и геоэлектрического полей. В бортах руч. Дальний картируются интенсивно гидротермально измененные андезиты (до аргиллизитов и опалитов) палеовулкана Термальный, в то время как на удалении от ручья исходные породы подвержены, в основном, выветриванию.

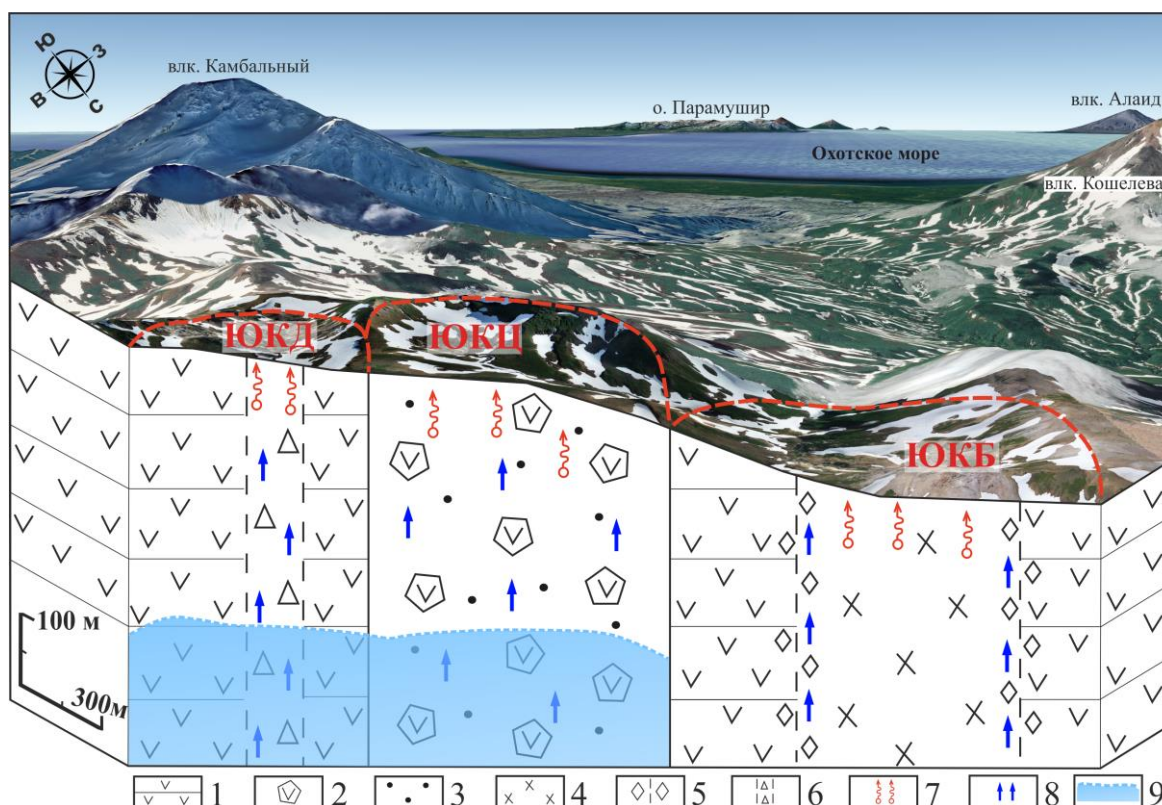


Рисунок 10. Концептуальная модель геологических структур южной группы термальных полей Камбального вулканического хребта [Нуждаев и др., 2024]. Красным контуром показаны границы структур, контролирующих основные термальные поля: 1 – андезиты и андезибазальты вулкана Термальный, 2 – крупные блоки исходных горных пород (андезитов), создающие систему неоднородностей в эродированном кратере ЮКЦ; 3 – гидротермально измененные породы – матрица кратерной зоны ЮКЦ; 4 – экструзивные дациты; 5 – эндо- и экзоконтактные зоны экструзий; 6 – субвертикальные тектонические нарушения; 7 – приповерхностное кипение; 8 – глубинный флюид; 9 – геотермальный резервуар.

Южно-Камбальное Центральное термальное поле локализовано в кольцевой морфоструктуре, вероятно, в эродированном кратере стратовулкана Термальный. Такая структурная позиция определяет изометричный характер разгрузки парогидротерм, наличие крупной обводненной зоны (геотермального резервуара?) до глубины ≥ 300 м, установленной по данным вертикальных электрических зондирований, а также низкие значения магнитной восприимчивости внутри морфоструктуры.

Южно-Камбальное Ближнее термальное поле расположено в полуцирке и приурочено к экструзивному комплексу дацитового состава «Цветные Скалы». Комплекс состоит из нескольких экструзий (предположительно отдельных блоков единого экструзивно-субвулканического тела), прорывающих лавы андезитового состава вулкана Термальный. К центральной, наиболее горячей и измененной до опалитов и вторичных кварцитов, экструзии приурочена основная разгрузка термальных вод в форме парагазовых выходов на дневной поверхности. Парагазовые

струи трассируют контактовые зоны и апикальную часть основной экструзии «Цветные Скалы». Корневые зоны последней, вероятно, служат источником или проводником тепла в этом термальном поле.

По результатам проведенных комплексных геолого-геофизических исследований определена гидродинамическая связь двух термальных полей южной группы – Дальнего и Центрального.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам магниторазведочных и других геофизических исследований, выполненных на термальных полях и геотермальных месторождениях Паужетско-Камбально-Кошелевского района Южной Камчатки, установлены следующие особенности геологического строения зоны разгрузки парогидротерм.

1. Зоны разгрузки парогидротерм на западном и восточном участках Паужетского геотермального месторождения существенно отличаются по своему строению.

На Восточном участке месторождения подъем глубинных термальных вод контролируется тектономагматическими блоками и происходит по контактовой зоне вдоль субвулканических тел. На Западном участке наблюдается латеральное растекание гидротерм верхнего водоносного горизонта по системе радиально-концентрических трещин в приподнятых тектонических блоках. Восточный участок перспективен на поиск высокотемпературных глубинных термальных вод, Западный – на выделение близповерхностных геотермальных резервуаров.

2. Разгрузка парогидротерм на Нижне-Кошелевском геотермальном месторождении происходит за счет подъема геотермального флюида по субвертикальной трещинно-жильной системе. Непосредственно под Нижне-Кошелевской термоаномалией выделена область аргиллизации пород, насыщенная парогазовой смесью и распространяющаяся на глубину более 250 м. Определены участки скрытой разгрузки термальных вод, приуроченные к линейным разрывным тектоническим нарушениям. Зона разгрузки парогидротерм связана субвертикальными каналами с глубинным источником газо-гидротермальных флюидов.

3. Каждое термальное поле южной группы Камбального вулканического хребта образовано в различных геологических условиях: Дальнее – в зоне линейного тектонического нарушения, Центральное – в эродированном кратере вулкана Термальный, Ближнее – в контактовой зоне экструзии кислого состава. По первым комплексным геофизическим данным установлена гидродинамическая связь Южно-Камбального Дальнего и Южно-Камбального Центрального термальных полей.

В ходе многолетних исследований, проводимых в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном районе, магниторазведка зарекомендовала себя как высокоэффективный геофизический метод

изучения гидротермальных систем. Современный приборный комплекс с встроенной GPS-привязкой измерений дает возможность проводить работы малой группой из двух человек. Компактность и относительно небольшой вес аппаратуры позволяет выполнять съемку в условиях высокогорного рельефа и удаленности от базового лагеря. Покрытие магнитной съемкой больших площадей в летний и, особенно, в зимний период, позволяет выделить крупные структурные неоднородности, геологические тела, тектонические нарушения, области гидротермально измененных пород на исследуемой территории. Кроме того, проведение магнитометрии является экономически обоснованным и мало затратным в сравнении с другими геофизическими методами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. **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, №5, 2024. С. 727-741.
2. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., **Нуждаев И.А.** Структура и изменение термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта (Камчатка) по температурным съемкам грунтов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, Вып. 61, № 1, 2024. С. 57-71.
3. **Нуждаев И.А.**, Рычагов С.Н., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Особенности магнитного поля геотермальных систем Паужетского района (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология, № 2, 2023. С. 33-51.
4. 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, № 1, 2021. С. 40-56.
5. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю., **Нуждаев И.А.**, Денисов Д.К. Строение зоны разгрузки парогидротерм Верхне-Паужетского термального поля // Геология и геофизика, Т. 61, № 9, 2020. С. 1194-1214.
6. Рычагов С.Н., Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О. Геолого-геофизическая модель крупнейшего на Камчатке Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения // Доклады АН, Т. 482, №2, 2018. С. 183-187.
7. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю., **Нуждаев И.А.**, Нуждаев А.А. Новые данные о строении зоны разгрузки гидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология, № 5, 2017. С. 36-50.
8. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонов Н.А., Рычагов С.Н., Нуждаев А.А., **Нуждаев И.А.** Геохимические особенности распределения основных и редкоземельных элементов в Паратунской и Большебанной гидротермальных системах Камчатки // Тихоокеанская геология, Т. 35, №6, 2016. С. 102-119.
9. **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О. Современное состояние изученности строения центральной части Нижне-Кошелевского геотермального месторождения и

Основные публикации в материалах конференций

1. **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О., Букатов Ю.Ю. Новые данные о строении термоаномалий Паужетско-Камбально-Кошелевского района на основе магнитометрической съемки // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 29-32.
2. **Нуждаев И.А.**, Букатов Ю.Ю., Феофилактов С.О. Моделирование структуры Южно-Камбального Центрального термального поля по геофизическим данным (Южная Камчатка) // Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука, Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 68.
3. **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О., Букатов Ю.Ю., Денисов Д.К. Геофизические исследования Южно-Камбального Центрального термального поля (Камбальный вулканический хребет, Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 146-149.
4. **Нуждаев И.А.**, Денисов Д.К., Феофилактов С.О. Магнитометрические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 163-166.
5. **Нуждаев И.А.** Уточнение строения геотермальных месторождений Паужетско-Камбально-Кошелевского района на основании магнитометрических исследований // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 185-188.
6. **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Магнитометрические исследования на геотермальных месторождениях Южной Камчатки // Материалы девятых научных чтений памяти Ю.П. Булашевича, Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2017. С. 310-314.
7. **Нуждаев И.А.**, Феофилактов С.О. Зимние магнитометрические исследования на Паужетском геотермальном месторождении: методика, краткие результаты // XII Региональная молодежная научная конференция «Исследования в области наук о Земле», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 75-84.
8. **Нуждаев И.А.**, Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Нижне-Кошелевское пародоминирующее геотермальное месторождение (Южная Камчатка) как полигон для изучения нефтегазоносных структур областей современного вулканизма // Материалы VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов), Новосибирск: НГУ, 2014. С. 345-346.
9. **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, Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2013. С. 818-822.
10. **Nuzhdaev I.A.**, Rychagov S.N., Abkadyrov I.F., Denisov D.K., Feofilaktov S.O. A conceptual model of the structure of the central part of the Nizhne-Koshelevsky geothermal field (South Kamchatka) // World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, 2021, <https://www.wgc2020.com>.