

На правах рукописи

ФЕОФИЛАКТОВ СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ

БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА): НОВАЯ ГЕОЛОГО-
ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Рычагов Сергей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геотермии ФГБУН Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

ФГБУН Институт _____

Защита состоится «__» _____ 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке.....

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «__» августа 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.022.03
кандидат физико-математических наук
А.А. Добрынина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект и предмет исследования

Объект исследования в данной работе представлен верхней частью литосферы Паужетского геотермального района Южной Камчатки, которая имеет сложное строение вследствие проявления метаморфизма, палео- и современных гидротермальных процессов. Предмет исследования – параметры эмпирически полученных физических величин, характеризующие геологическую среду (такие как электрическое сопротивление, электропроводность, напряженность магнитного поля, поле силы тяжести, скорость распространения упругих волн, температура). Путем проведения геофизических исследований на поверхности возможно определить параметры физических полей, которые связаны с состоянием изучаемой среды (массива горных пород). Выявленные геофизические аномалии представляют большой интерес поскольку указывают на термодинамические условия геологической среды, наличие гидротермальных растворов и путей их перетока, фильтрации и поступления к поверхности.

Актуальность темы исследования

Изучению геологического строения Паужетской гидротермальной системы посвящено много работ [Паужетские горячие воды..., 1965; Аверьев, 1966; Белоусов, 1978; Долгоживущий..., 1980; Структура..., 1993; и др.]. В целом, на основании геологических исследований в 1960-80-х годах показано общее геологическое строение Паужетской гидротермальной системы, ее локализация в одноименной вулcano-тектонической депрессии и приуроченность к западному склону вулканического хребта Камбальный. Разработана модель теплового питания и разгрузки термальных вод. Согласно этой модели, источником тепла предполагаются магматические очаги вулканического хребта Камбальный, термальные воды по двум водоносным горизонтам стекают с тектоно-магматического поднятия хребта Камбальный и разгружаются в пределах центральной части Паужетской депрессии, образуя одноименную гидротермальную систему, возраст которой оценивается примерно в 10 тыс. лет [Набоко, 1980]. Таким образом, считается, что источник тепла для Паужетской гидротермальной системы является наведенным, т.е. он находится за пределами ее геологической структуры [Паужетские горячие воды..., 1965; Сугробов, 1979].

Существующая гипотеза подверглась критике уже в начале 1980-х годов [Воронков, 1983; Воронков, 1985], а по результатам дополнительного бурения на Паужетском месторождении установлено наличие в структуре гидротермальной системы приподнятых тектоно-магматических блоков, играющих важную роль в формировании потоков гидротерм [Структура..., 1993]. Установлено, что внутри и по границам приподнятых тектоно-магматических блоков длительное время развивались мощные зоны кипения минерализованных растворов, как результат смешения восходящих высокотемпературных гидротерм с инфильтрационными водами [Жатнуев и

др., 1996]. По геохимическим данным глубинные воды, циркулирующие в приподнятых тектоно-магматических блоках, обогащены легким изотопом стронция, а также содержат повышенные концентрации Au, Ag, Hg, редких щелочных и редкоземельных элементов [Сандиминова, 1993]. Определено наличие гидротермально-метасоматической зональности (от вторичных кварцитов и пропицитов различных фаций к аргиллизитам), отражающей длительное (миллионы или сотни тысяч лет) и последовательное развитие гидротермальной системы, т.е. ее палеоэтап [Коробов и др., 1993; Коробов, 1994]. Представленные факты указывают на наличие крупных магматических очагов и остывающих интрузий в пределах центральной части Паужетской вулкано-тектонической депрессии и, следовательно, в структуре самой гидротермальной системы.

Проведенные геофизические исследования на Паужетском геотермальном месторождении [Зайцев, 1970] указывают на сложное строение Паужетской гидротермальной системы, относительно надежная информация о структуре которой имеется только на участках геотермального месторождения, т.е. разбуренных большим количеством скважин.

Все отмеченное выше послужило основанием для постановки детальных комплексных геофизических исследований на площади Паужетской гидротермальной системы с использованием современного аппаратного комплекса, соответствующих расчетных методик и компьютерных программ.

Цель и задачи исследования

Целью исследований является выделение геологических структур, контролирующих перенос тепла в районе Паужетской гидротермальной системы, создание геолого-геофизической модели зон разгрузки парогидротерм Паужетского геотермального месторождения.

Решаются следующие задачи:

1. Получение новых фактических данных о геологическом строении Паужетской гидротермальной системы и одноименного геотермального месторождения с использованием комплекса современных геофизических методов и учетом имеющихся материалов бурения скважин, геологических съемок и тематических научных работ.

2. На основе проведения комплексных геофизических исследований на площади Паужетского геотермального месторождения - выделение следующих геолого-гидрогеологических структур: системы блоков, контролирующих водное и тепловое питание месторождения; зон кипения перегретого флюида и локальных зон приповерхностного кипения растворов; участков распространения гидротермально измененных пород.

3. Построение блоковой модели Паужетского геотермального месторождения по полученным геолого-геофизическим данным.

Этапы выполнения исследования

Работа выполнена в течение продолжительного промежутка времени (2007-2020 гг.) и включала в себя следующие этапы:

1) изучение имеющегося материала по Паужетскому геотермальному району и Южной Камчатке;

2) проведение полевых геофизических исследований комплексом методов на площади Паужетской гидротермальной системы и Паужетского геотермального месторождения. Ввиду климатических и географических особенностей расположения объектов работ этот этап исследований занял наибольшую часть времени;

3) обработка и интерпретация полученных данных по каждому методу исследований, их увязка с имеющимися материалами;

4) разработка геолого-геофизических моделей строения участков Паужетского геотермального месторождения и в целом Паужетской гидротермальной системы на основе комплексной интерпретации имеющегося материала.

Методы исследований

Геофизические исследования выполнены методами магниторазведки, гравиразведки, микросейсмического зондирования, термометрии и электроразведки. Электроразведка включала: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), измерения методом естественного потенциала (ЕП), аудио магнитотеллурическое (АМТЗ) и магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). Для каждого метода использовались современный аппаратный комплекс и соответствующее программное обеспечение (подробное описание дано в Главе 2). Полевые работы и обработка полученного материала проведены при непосредственном участии диссертанта. Высокая достоверность представленных моделей достигается путем комплексирования методов геофизических исследований и хорошей геологической изученности месторождения.

Положения, выносимые на защиту

1. На основании комплексных геофизических исследований определены строение и происхождение зоны разгрузки парогидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля. Установлено, что термальное поле характеризуется слоисто-блоковым строением аргиллизированных пород и положительными аномалиями магнитного и гравитационного полей в центральной части структуры. Геолого-геофизическая модель Восточно-Паужетского термального поля предусматривает выделение субвулканического тела среднего или основного состава, апикальные части которого являются зонами подъема глубинных термальных вод к дневной поверхности.

2. Согласно геолого-геофизическим данным структура зон циркуляции различных типов вод в центральной части Паужетского геотермального

месторождения определяется концентрически-зональным строением приподнятого тектоно-магматического блока и распределением геологических неоднородностей, как первичных (магматического или вулканогенно-осадочного происхождения), так и образованных вследствие гидротермально-метасоматического изменения вмещающих пород. Формирование структуры зон разгрузки восходящих термальных вод на Паужетском месторождении продолжается в настоящее время.

3. На основании магнитотеллурического зондирования выделен горизонт разуплотненных горных пород на глубине от 3-4 до 8-9 км между меловым и кристаллическим фундаментами, который служит источником теплового питания Паужетской гидротермальной системы. Выступы мелового и кристаллического фундамента, по-видимому, представленные крупными интрузивными комплексами, определяют высокую проницаемость верхних горизонтов земной коры в районе Паужетского геотермального месторождения. Участки повышенной тектоно-магматической активности, такие как Верхне- и Восточно-Паужетское термальные поля, являются субвертикальными каналами, связывающими глубинный тепловой поток с близповерхностными водоносными горизонтами.

Научная новизна работы

Проведенные ранее геолого-геофизические и гидрогеологические исследования на Паужетском геотермальном месторождении не позволили решить многие принципиальные вопросы: об источниках тепла и глубинных растворов, о структуре подводящих каналов для парогидротерм, строении зон смешения термальных и метеорных вод и зон кипения растворов, геологической природе зон разгрузки термальных вод. Сформулированная в 1960-70-ых годах модель теплового питания Паужетской гидротермальной системы и месторождения за счет поступления термальных вод по двум пологопадающим горизонтам со стороны Камбального вулканического хребта (авторы В.В. Аверьев, В.М. Сугробов, В.И. Белоусов и др.) требует существенной корректировки. На это указывают опыт эксплуатации месторождения и получение новых данных о строении центральной части гидротермальной системы [Структура..., 1993; Рычагов, 2003].

На основании оригинальных данных, представленных в диссертации, и использования комплекса современного геофизического оборудования и соответствующих методик получены следующие новые научные результаты:

- 1) определено строение и физические характеристики зон разгрузки парогидротерм;
- 2) выделена система блоков, контролирующая разгрузку теплового потока в структуре Паужетского геотермального месторождения;
- 3) определен глубинный источник тепла для Паужетской гидротермальной системы;
- 4) решен ряд фундаментальных научных и практических вопросов, имеющих принципиальное значение не только для Паужетской

гидротермальной системы, но и других гидротермальных систем Южной Камчатки.

Личный вклад

Будучи постоянным начальником структурно-геофизического отряда Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН диссертант активно участвовал в постановке научной проблемы комплексных исследований на Паужетской гидротермальной системе, в организации и проведении ежегодных полевых работ, систематизации данных и построении геолого-геофизических моделей. Автором выполнены следующие работы:

1) сбор и обобщение литературных данных и фондовых материалов по изучению структуры современных гидротермальных систем и геотермальных месторождений Паужетского (Паужетско-Камбально-Кошелёвского) района Южной Камчатки. Систематизация геолого-структурных, геофизических, гидрогеологических и др. данных по современным гидротермальным системам мира – с целью характеристики Паужетской гидротермальной системы в сравнение с близкими по строению вододоминирующими гидротермальными системами других регионов;

2) проведение и интерпретация электроразведочных работ методами ВЭЗ и ЕП на всех этапах работы, а также участие в полевых измерениях и обработке материалов всех представленных геофизических методов (электроразведка, магниторазведка, гравиразведка, терморазведка, микросейсмическое зондирование);

3) комплексная интерпретация данных: расчеты и построение предварительных моделей по каждому направлению исследований;

4) обсуждение результатов и создание геолого-геофизических моделей зон разгрузки парогидротерм Паужетского геотермального месторождения и одноименной гидротермальной системы.

Практическое применение

Совокупность полученной информации о теплопроводящих структурах месторождения может помочь ответить на центральный вопрос в обсуждаемой проблеме – о природе и местоположении источника тепла для Паужетской гидротермальной системы. Решение этого вопроса имеет большое практическое значение в связи с остыванием теплоносителя на эксплуатируемых участках - эта тенденция была отмечена еще в работе [Структура ..., 1993]. Так, в настоящее время прекращена эксплуатация первого на месторождении (Северного) участка, отбор тепла для Паужетской ГеоЭС происходит только на одном, введенном в эксплуатацию в 1980-х годах, Южном, участке. По заключениям специалистов ОАО «Камчатскбургеотермия» (устное сообщение главного геолога Л.А. Ворожейкиной) назрела настоятельная необходимость бурения новых скважин на месторождении с целью поиска гидрогеологических структур, контролирующих высокотемпературный теплоноситель. Выбор точек

заложения продуктивных скважин невозможен без проведения комплекса современных геофизических исследований на площади гидротермальной системы и уточнения ее геологического строения. Предложенная модель строения Паужетской гидротермальной системы будет востребована в практике поисково-разведочных работ и при эксплуатации Паужетского и других геотермальных месторождений Южной Камчатки.

Степень достоверности

Достоверность представленных данных, используемых в диссертационной работе, обеспечивается использованием современной аппаратуры для проведения геофизических исследований и стандартных методик (программного обеспечения) расчетов физических параметров. Обоснованность и достоверность научных выводов, содержащихся в работе, подтверждаются согласованностью как полученных результатов геофизических исследований между собой, так и полученных моделей с имеющейся детальной геолого-геофизической информацией по рассматриваемому району.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов на 10 российских и 2 международных научных конференциях: региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога (г. Петропавловск-Камчатский, 2016, 2017, 2019); Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2017); Всероссийской Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов) (г. Новосибирск, 2014, 2018); Девятых научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича (г. Екатеринбург, 2017); Региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки» (г. Петропавловск-Камчатский, 2011, 2014); Международном геотермальном конгрессе World Geothermal Congress (Мельбурн, 2015; Рейкьявик, 2021).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 3 статьи в журналах «Геология и геофизика» и «Вулканология и сейсмология», 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 состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы общим объемом 162 страницы, включающим 62 иллюстрации. Список литературы состоит из 182 наименований, в том числе 64 иностранных.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н. С.Н. Рычагову за высокопрофессиональное руководство и всестороннюю помощь на всех этапах проведения настоящего исследования.

Автор искренне признателен всем сотрудникам лаборатории геотермии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН за поддержку и помощь в проведенных исследованиях;

«товарищам по оружию» И.А. Нуждаеву, Ю.Ю. Букатову, И.Ф. Абкадырову, Д.К. Денисову за большой вклад в проведение полевых наблюдений и интерпретацию полученного материала;

сотрудникам Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова М.С. Чернову, И.Е. Большакову, Р.А. Кузнецову, А.Б. Ермолинскому и др. за помощь в проведении полевых исследований, ценные замечания на этапе проведения и обсуждении работы;

научной группе под руководством д.г.-м.н. Ю.Ф. Мороза: В.А. Логинову, И.С. Улыбышеву, О.М. Самойловой, М.А. Клементьеву, Ю.В. Новикову за сотрудничество, благодаря которому удалось провести работу методами АМТЗ и МТЗ на Паужетском геотермальном месторождении;

студентам-практикантам Камчатского государственного университета им. Витуса Беринга и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, которые участвовали и старательно помогали в проведении полевых исследований.

Частично работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-35-00138; 19-05-00102), один из которых выполнен под руководством автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние исследований геотермальных районов, систем и месторождений геолого-геофизическими методами

В главе представлен обзор современных геолого-геофизических исследований в Мировой практике. Приведены существующие модели крупнейших геотермальных систем и месторождений Мира. Рассмотрены модели строения наиболее изученных геотермальных систем Южной Камчатки.

Глава 2. Паужетский геотермальный район, одноименные гидротермальная система и геотермальное месторождение

Глава посвящена описанию Паужетского геотермального района, истории выделения Паужетского геотермального месторождения и этапам его освоения. Район знаменит тем что здесь в 1966 г. построена первая в СССР геотермальная станция, которая производит энергию и сегодня. Представлено подробное геологическое описание района и основных термальных полей. Существует модель теплового питания и разгрузки

термальных вод. Согласно этой модели, источником тепла являются магматические очаги вулканического хребта Камбальный, термальные воды по двум водоносным горизонтам стекают с тектоно-магматического поднятия хребта Камбальный и разгружаются в пределах центральной части Паужетской депрессии, образуя одноименную гидротермальную систему (рис. 1). Считается, что источник тепла для Паужетской гидротермальной системы находится за пределами ее геологической структуры [Паужетские горячие воды..., 1965; Сугробов, 1979; Набоко, 1980].

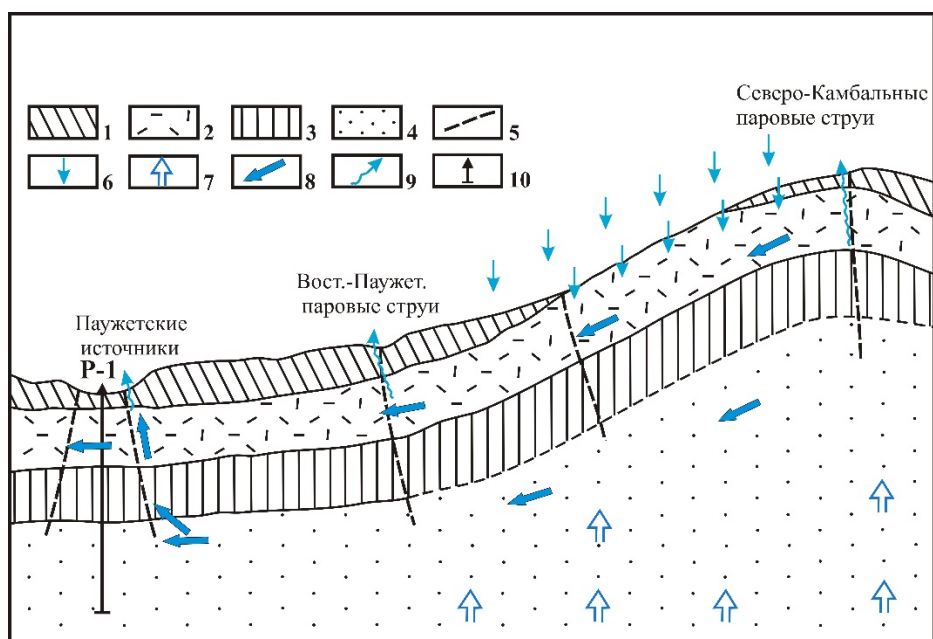


Рисунок 1. Концептуальная схема формирования и разгрузки Паужетских гидротерм [Паужетские..., 1965]. 1 – алевропелитовый чехол; 2 – псефитовые туфы; 3 – спекшиеся туфы; 4 – туфопесчаники; 5 – разломы; 6 – инфильтрационные воды; 7 – эндогенный пар; 8 – высокотермальные воды; 9 – паровые струи; 10 – скважины.

На Паужетском месторождении в 1960-х гг. проведены геофизические исследования методами электроразведки, магниторазведки, терморазведки с целью доразведки месторождения. Представлены имеющиеся данные по петрофизическим свойствам пород Паужетского геотермального месторождения, что важно для создания геолого-геофизических моделей.

Глава 3. Аппаратура и методика геофизических исследований

В главе подробно описаны аппаратура и методика проведенных геофизических работ на Паужетском геотермальном месторождении. Исследования выполнены методами электроразведки, магниторазведки, гравиразведки, микросейсмического зондирования, терморазведки. Работы проведены современным аппаратным комплексом с соблюдением стандартных методик, полученные данные обработаны с использованием соответствующего пакета программ. Такой подход обеспечивает хорошую точность и достоверность представленных данных.

Глава 4. Фактический материал и его интерпретация

В главе представлены фактические данные о проведенных геофизических исследованиях на Паужетском геотермальном месторождении. Работа проводилась на основных термальных полях (районы Верхне-Паужетского и Восточно-Паужетского термальных полей) и по профилю А-В, выходящему за пределы месторождения (рис. 2). Полученные результаты представлены по районам и задачам исследований.

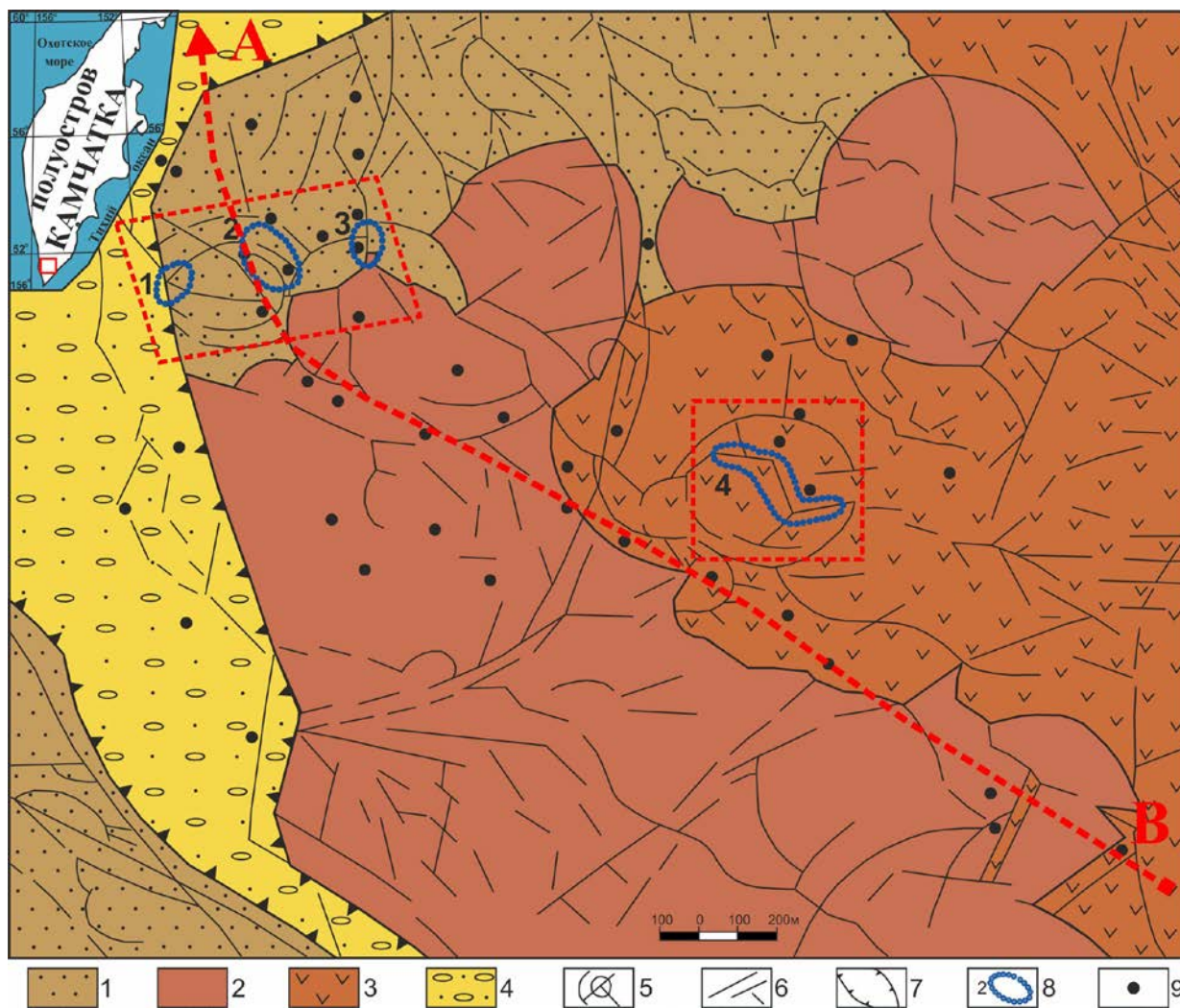


Рисунок 2. Схематическая геологическая карта Паужетской гидротермальной системы с дополнениями [Структура ..., 1993]. 1 – туффиты и туфы верхнепаужетской подбиты верхней неоген -нижнечетвертичного возраста; 2 – лаво-экструзивный комплекс пород кислого состава среднечетвертичного возраста; 3 – андезиты и андезибазальты среднечетвертичного возраста; 4 – аллювиальные валунно-галечные отложения; 5 – кольцевые тектонические нарушения, оконтуривающие приподнятые блоки пород и контролирующее положение термальных полей; 6 – система линейных тектонических нарушений; 7 – Паужетский грабен верхнечетвертичного возраста; 8 – термальные поля: 1 – Южно-Паужетское, 2 – Верхне-Паужетское, 3 – Нижне-Паужетское, 4 – Восточно-Паужетское; 9 – глубокие скважины.

Красным пунктиром показано расположение участков и профиля А-В, на которых проводились комплексные геофизические исследования.

Район Восточно-Паужетского термального поля (фланг Паужетского геотермального месторождения) по результатам температурной съемки грунтов характеризуется прогретой центральной частью термоаномалии (максимальная температура грунта на глубине 80 см достигает 105 °С). По периферии поля выделены отдельные участки с температурой грунтов до 70 °С, к ним приурочены отдельные парогазовые струи и кипящие котлы.

По результатам электроразведочных работ методом ВЭЗ построен геоэлектрический разрез для Восточно-Паужетского термального поля, где выделено 5 контрастных по удельному электрическому сопротивлению (ρ) слоев (рис. 3). Минимальные значения ρ – 2.5 Ом·м соответствуют горизонту «в», который представлен плотными и относительно сухими глинами с высокой степенью пропаривания и минерализации субстрата. Значения ρ к основанию разреза увеличиваются до первых десятков Ом·м, что соответствует в меньшей степени обводненным массивным породам.

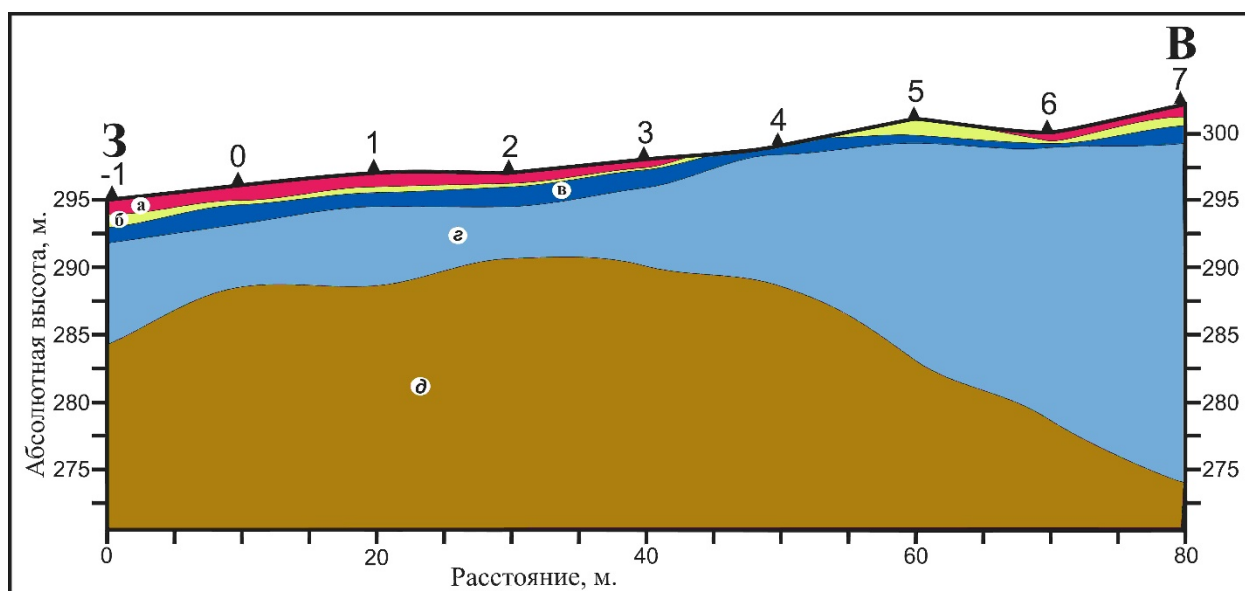


Рисунок 3. Геоэлектрический разрез Восточно-Паужетского термального поля [Феофилактов и др., 2017]. Выделены слои (а - д), контрастные по удельному сопротивлению среды: а – 30-50 Ом·м; б – 10-12 Ом·м; в – 2.5 Ом·м; г – 4-6 Ом·м; д – 10-20 Ом·м.

На основании магниторазведочных работ в центральной части Восточно-Паужетского термального поля выделена интенсивная положительная аномалия - до +690 нТл (рис. 4), что указывает на залегание в приповерхностной части разреза гидротермально неизмененных пород.

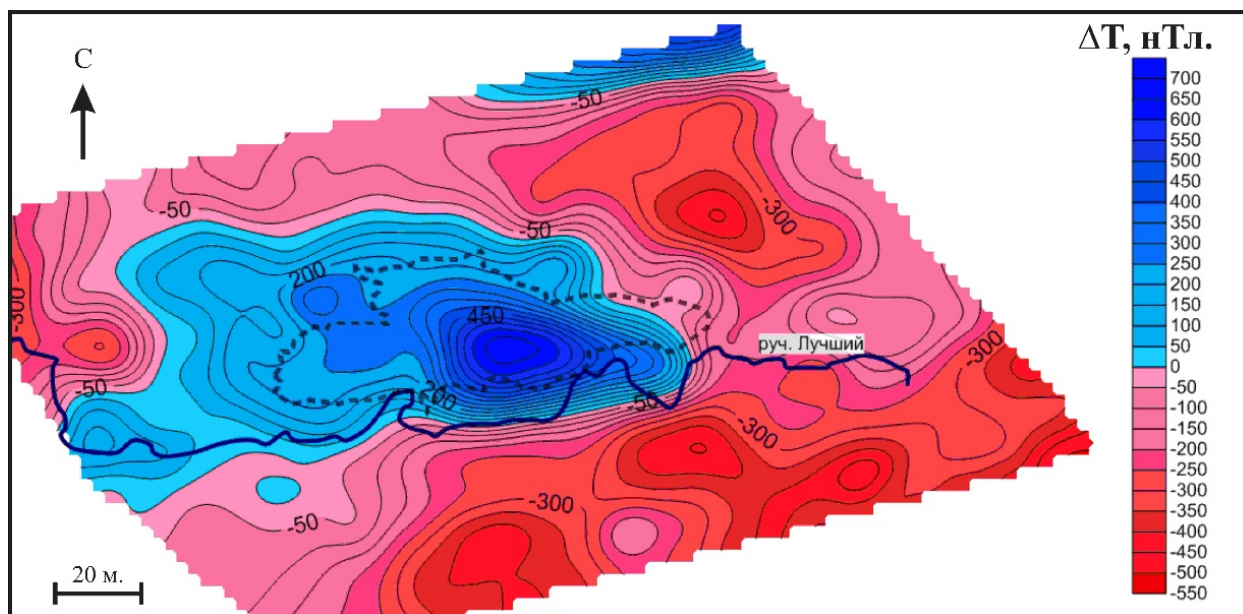


Рисунок 4. Карта распределения значений аномального магнитного поля ΔT_a для Восточно-Паужетского термального поля [Феофилактов и др., 2017].

По результатам гравиразведочных работ получены повышенные значения аномального гравитационного поля в редукции Буге (Δg) в центральной части термального поля, что согласуется с данными магниторазведки и указывает на наличие пород высокой плотности в приповерхностной части разреза.

Центральная часть Паужетского геотермального месторождения (район Верхне-Паужетского термального поля) по результатам температурной съемки грунтов характеризуется высокими температурами до $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центральных частях термальных полей (Южно-, Верхне- и Нижне-Паужетского), которые объединяются в единую прогретую область по изотерме $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На геоэлектрическом разрезе (электроразведка методом ВЭЗ) для Верхне-Паужетского термального поля выделяется 5 горизонтов с контрастными значениями ρ (рис. 5). Минимальные значения ρ – $2\text{--}7\text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответствуют горизонту «б» который представлен породами верхнего водоносного горизонта туфов паужетской свиты. Этот горизонт неоднороден по мощности и разделен зоной повышенных значений ρ – $10\text{--}25\text{ Ом}\cdot\text{м}$ (горизонт «в») представленной трещиноватыми туфами, поры которых выполнены цеолитами, пиритом, минералами кремнезема.

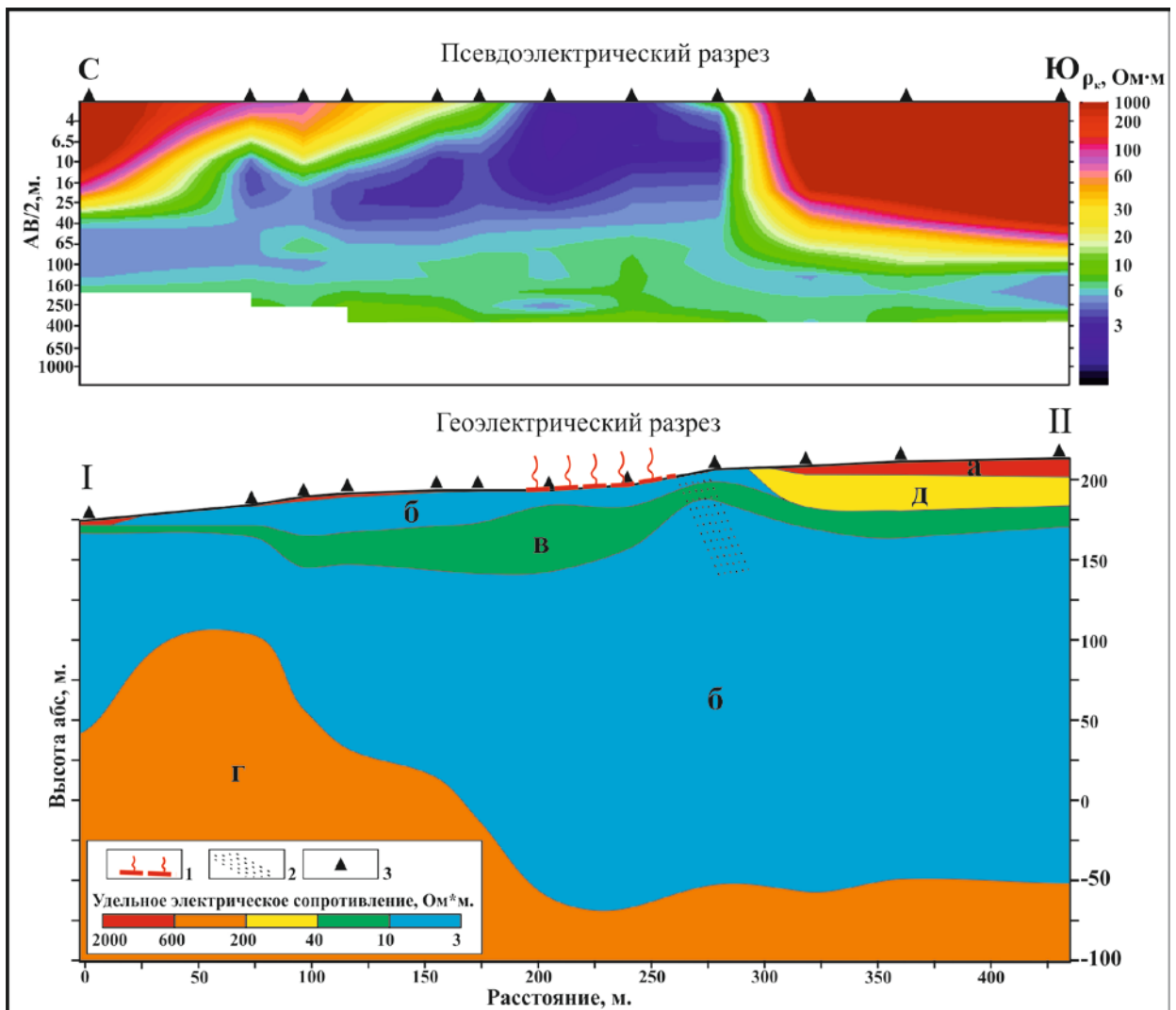


Рисунок 5. Псевдо- и геозлектрический разрезы района Верхне-Паужетского термального поля [Феофилактов и др., 2020]: а-д – слои, контрастные по удельному электрическому сопротивлению среды (см. текст). 1 – область разгрузки парогидротерм на дневной поверхности; 2 – зона нарушения сплошности среды; 3 – пункты ВЭЗ.

На карте распределения аномального магнитного поля ΔT_a выделяется крупная положительная аномалия (рис. б) в центральной части которой находится участок с низкими значениями ΔT_a (до -150 нТл), к которому приурочена разгрузка Верхне-Паужетского термального поля.

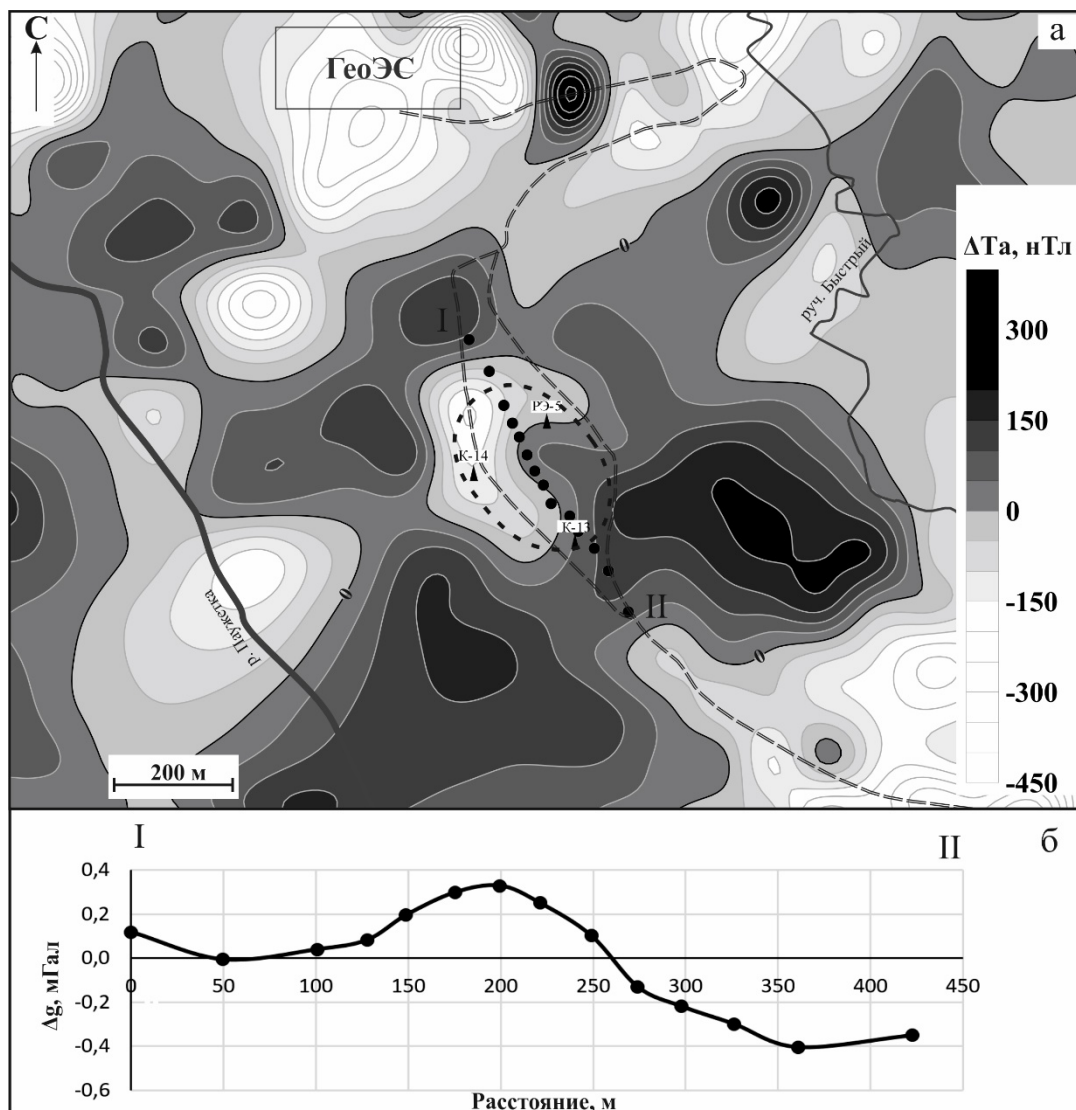


Рисунок 6. Схема распределения значений аномального магнитного ΔT_a в центральной части Паужетского геотермального месторождения (а) и график распределения значений аномального гравитационного поля в редукции Буге (Δg) по профилю (б) [Феофилактов и др., 2020]. Пунктиром выделен район Верхне-Паужетского термального поля.

По результатам гравиразведки участок Верхне-Паужетского термального поля выделяется повышенными значениями Δg (+0.33 мГал), что указывает на наличие пород высокой плотности в приповерхностной части разреза.

Геофизические исследования района Паужетской гидротермальной системы выполнены по одному протяженному профилю (см. рис. 2). Построены геоэлектрические разрезы по электроразведочным данным ВЭЗ, АМТЗ и МТЗ. По результатам ВЭЗ построен геоэлектрический разрез верхней части геологического разреза (глубина до 500-600 м). Выделены неоднородности в строении верхнего водоносного комплекса Паужетской гидротермальной системы (горизонты с значениями $\rho = 3-40$ Ом·м).

По результатам электромагнитных исследований (АМТЗ и МТЗ) в геоэлектрическом разрезе района Паужетской гидротермальной системы выделено 6 горизонтов (рис. 7):

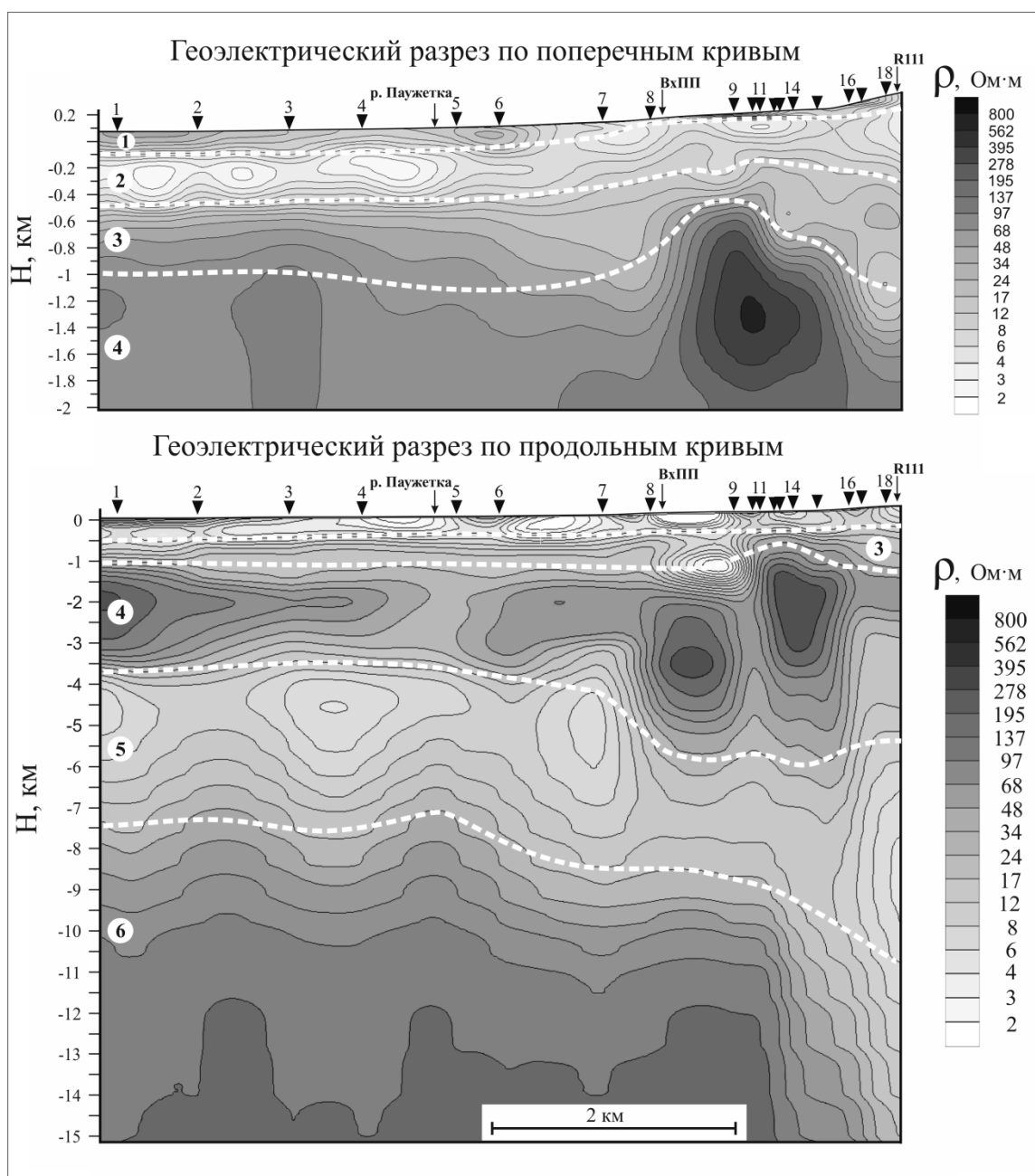


Рисунок 7. Геоэлектрический разрез района Паужетской гидротермальной системы по данным МТЗ и АМТЗ [Феофилактов и др., 2021].

- 1 - слой аллювиально-делювиальных отложений мощностью до 100 м;
- 2 - толща туфов и туфогенно-осадочных пород Паужетской свиты - являющихся водовмещающими горизонтами в структуре гидротермальной системы;
- 3 - толща вулканомиктовых песчаников-гравелитов анавгайской серии, считающихся нижним водоупором;

4 - отложения мелового фундамента, представленные в этом районе метаморфизованными песчаниками и вулканогенными породами; мощность горизонта колеблется от 1.5 до 5 км;

5 - горизонт, по-видимому, разуплотненных пород мелового или более древнего возраста, представляющий собой зону повышенной проводимости для геотермального флюида - "коровый проводящий слой"; мощность горизонта достаточно выдержана и составляет 4-5 км; в правой части разреза происходит его погружение под структуру Камбального вулканического хребта;

6 - породы кристаллического фундамента в интервале глубин от 8-9 км и более.

По результатам гравиразведки и магниторазведки построены графики распределения потенциальных полей (рис. 8). По степени интенсивности распадаения значений профиль можно разделить на две части с центром в районе р. Паужетки. Левая часть графика соответствует Паужетскому грабену, правая – территории Паужетского геотермального месторождения. По графику ΔT_a отмечаются структурные элементы геологического строения района [Структура ..., 1993].

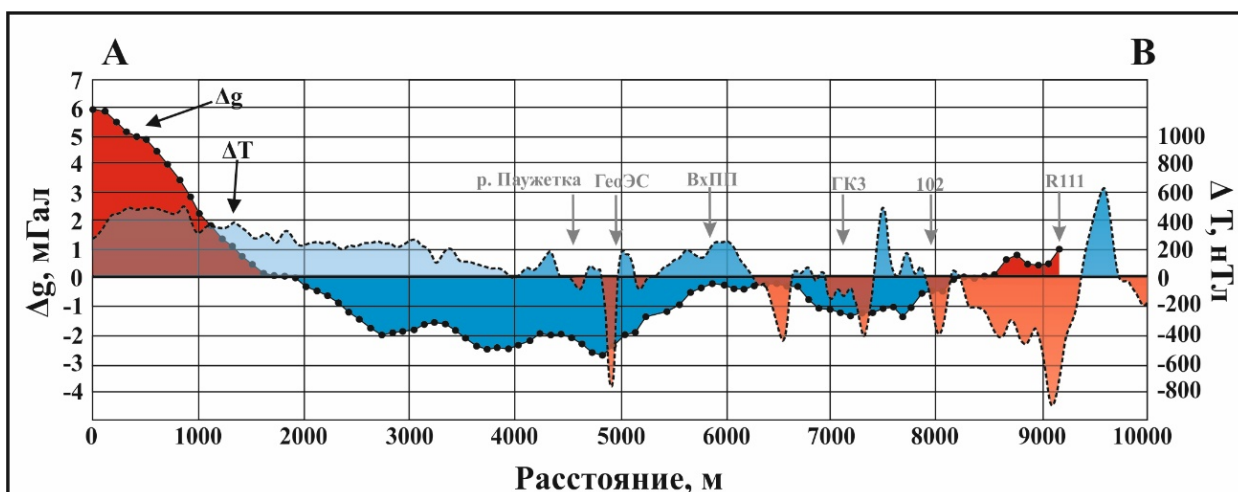


Рисунок 8. Графики распределения значений аномального магнитного поля (ΔT_a) и гравитационного поля в редукции Буге (Δg) с учетом рельефа местности по профилю А - В [Феофилактов и др., 2021].

По результатам микросейсмических зондирований показано что верхняя часть разреза до глубины 200 м разделена на две очень контрастные аномалии. В ЮЗ части профиля расположена высокоскоростная аномалия, которая соответствует консолидированным породам. СВ часть профиля, наоборот, представлена ярко выраженной низкоскоростной приповерхностной аномалией, что связано с активной гидротермальной деятельностью. В центральной части разреза выделена крупная субвертикальная низкоскоростная аномалия, распространяющаяся на глубину более 1 км.

Глава 5. Геолого-геофизические модели строения термальных полей, геотермального месторождения и гидротермальной системы

В главе представлены результаты комплексного геофизического моделирования с учетом имеющихся геологических данных и предложены концептуальные модели блокового строения участков Паужетского геотермального месторождения и Паужетской гидротермальной системы. По каждому разделу этой главы представлено защищаемое положение.

Модель структуры Восточно-Паужетского термального поля основана на блоковой модели по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных (рис. 9), в основе которой лежит выделение аномалообразующего тела высокой плотности и магнитной восприимчивости (2.4 г/см^3 и 0.37 СИ соответственно) на глубине $20 - 30 \text{ м}$ от поверхности. Модель согласуется с геоэлектрическим разрезом по результатам ВЭЗ.

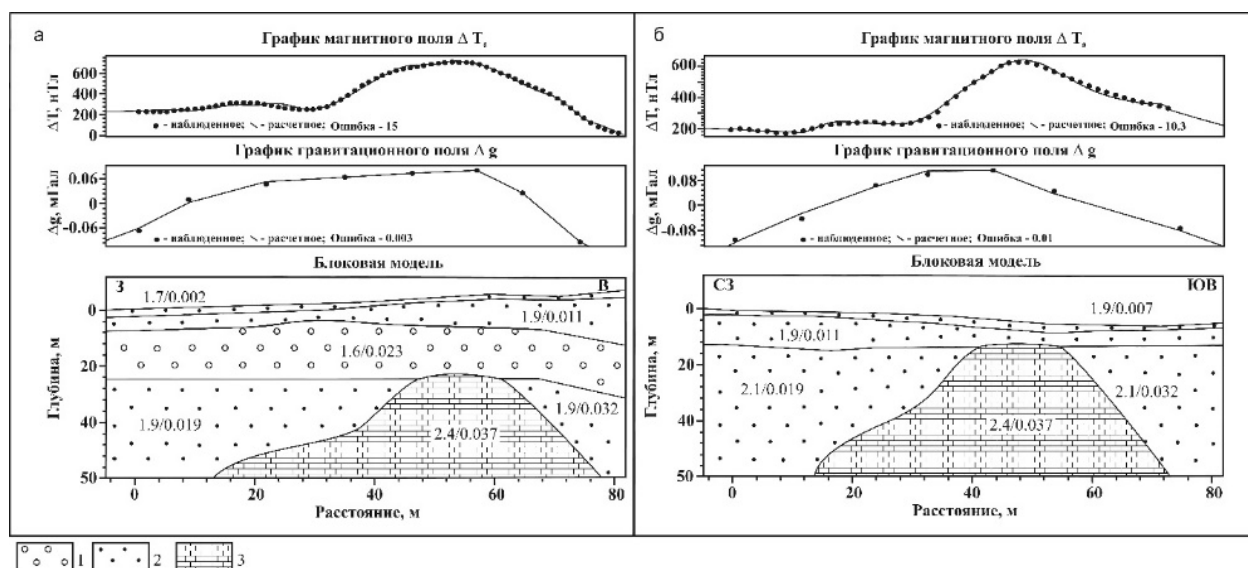


Рисунок 9. Модель структуры Восточно-Паужетского термального поля, построенная на основании гравиразведочных, магниторазведочных и литологических данных по профилям: а – по меридиональному, б – по широтному. 1 – группа блоков с плотностью 1.6 г/см^3 , 2 – то же, $1.7-2.1 \text{ г/см}^3$, 3 – то же, 2.4 г/см^3 [Феофилактов и др., 2017]. Цифрами на схеме отмечены средние значения плотности и магнитной восприимчивости (в знаменателе) для каждого блока.

Построена концептуальная модель структуры и условий образования зоны разгрузки парогидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (рис. 10). Модель базируется на выделении субинтрузивного тела основного или среднего состава, кровля которого находится на глубине в первые десятки метров. Тело прорывает туфы верхнепаужетской подсветы и внедряется в подошву лавового комплекса андезитов среднечетвертичного возраста Камбального хребта. В его апикальной части и в перекрывающих андезитах образовалась система блоков с контрастными физико-механическими свойствами пород: 1) разуплотненных трещиноватых и 2) массивных, относительно непроницаемых для газо-водных флюидов.

Следовательно, субинтрузивное тело может играть роль природного деформографа и проводника глубинных флюидов, оказывающих влияние на гидротермальную систему.

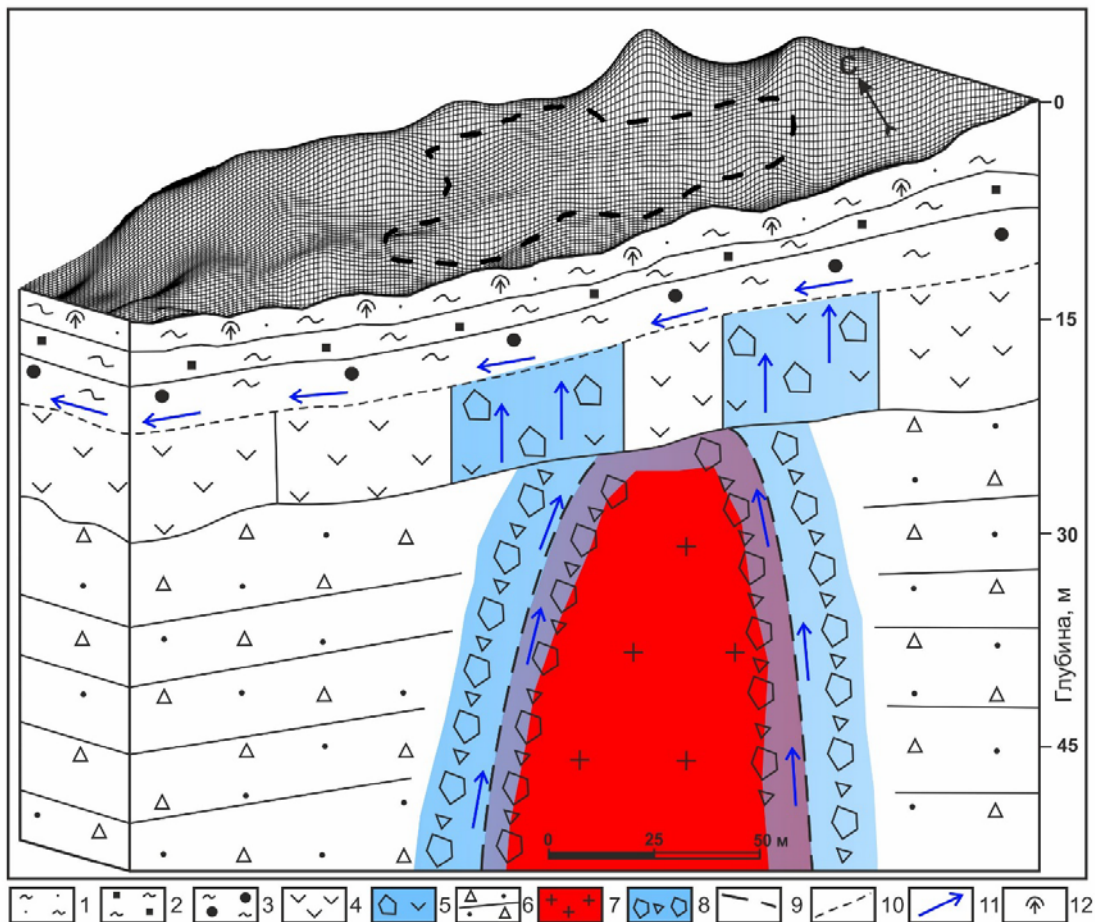


Рисунок 10. Концептуальная модель структуры зоны разгрузки парогидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля [Феофилактов и др., 2017]. 1 – горизонт гидротермальных глин зоны сернокислотного выщелачивания; 2 – горизонт тугопластичных влагонасыщенных глин; 3 – горизонт “сухих” глин, включающий слои с минеральными рудными ассоциациями; 4 – лавы андезитов; 5 – то же, интенсивно трещиноватые и брекчированные; 6 – туфы и туффиты верхнепаужетской подсвиты; 7 – субинтрузивные породы; 8 – брекчии в эндо-экзоконтактной зоне субинтрузивного тела; 9 – условная граница апикальной части субинтрузивного тела; 10 – подошва толщи гидротермальных глин – зона растекания смешанных термальных вод; 11 – восходящие газо-водные флюиды; 12 – зона интенсивного испарения влаги. В плане на рельеф дневной поверхности наложен условный контур неоднородности, отраженной в различных физических полях и совпадающей с наиболее прогретой частью термального поля.

Модель строения Паужетского геотермального месторождения. Проведено грави-магнитное моделирование с использованием всей имеющейся информации для центральной части Паужетского геотермального месторождения. Определено, что аномалообразующее тело расположено на глубине 40-60 м, радиус его равен 100 м (рис. 11). В районе Верхне-Паужетского поля выделяется блок с повышенными значениями

плотности и низкими значениями магнитной восприимчивости (2.2 г/см³ и 0.023 СИ соответственно). Такими свойствами обладают гидротермально измененные породы района. Представленный блок оконтурен участками с низкими значениями плотности и магнитной восприимчивости (1.9 г/см³ и 0.02 СИ соответственно).

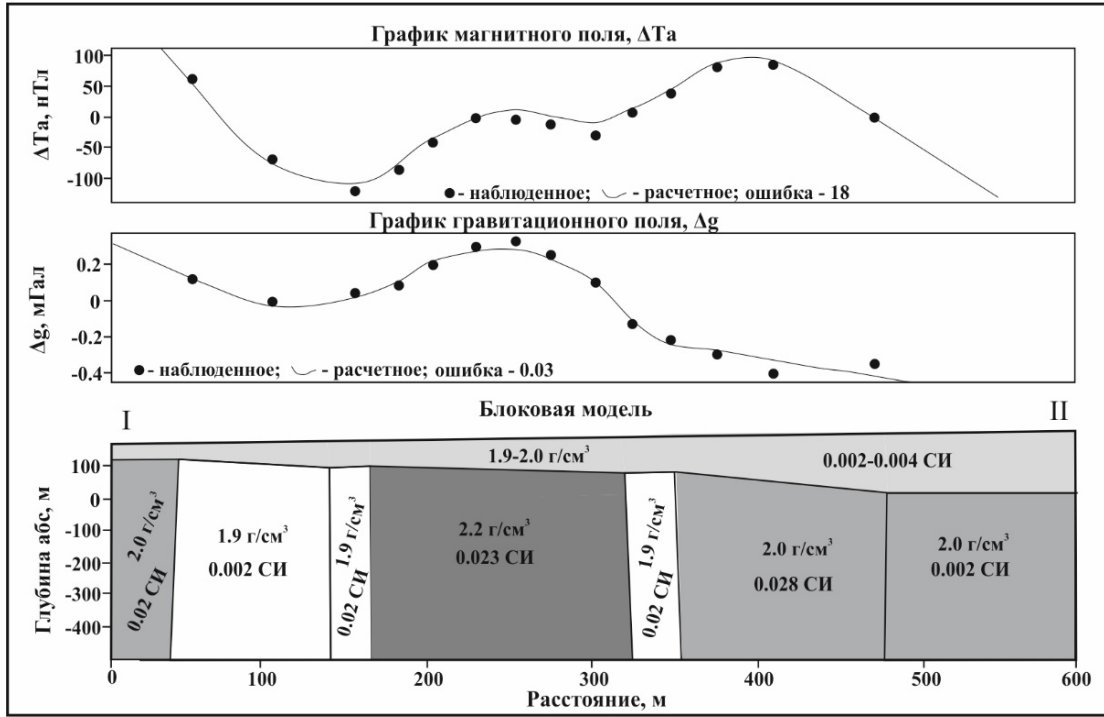


Рисунок 11. Блоковая модель строения района Верхне-Паужетского термального поля по грави-магнитным данным [Феофилактов и др., 2020].

Представлена концептуальная модель строения Верхне-Паужетского термального поля (центральной части Паужетского геотермального месторождения). В центральной части модели лежит приподнятый тектонический блок (рис. 12), образование которого обусловлено внедрением в ослабленные зоны интрузий диоритов и габбро-диоритов на этапе формирования многоступенчатого резургентного поднятия Камбального вулканического хребта [Долгоживущий ..., 1980]. Субвулканические фации этих интрузий среднего и кислого состава в форме даек и межпластовых тел, видимо, играют роль структурных деформографов: в апикальных частях субинтрузий образуются зоны повышенной трещинно-поровой проницаемости. Предполагается, что формирование структуры зон разгрузки парогидротерм Паужетского месторождения происходило в течение голоцена [Геотермальные ..., 2005]. Однако, исходя из того, что взаимодействие термальных вод с вмещающими породами (туфами и андезитами) приводит к увеличению мощности толщи аргиллизитов, повышению трещинно-поровой проницаемости в подошве верхнего водоупора можно сделать вывод, что формирование структуры зон разгрузки восходящих термальных вод на Паужетском геотермальном месторождении продолжается в настоящее время.

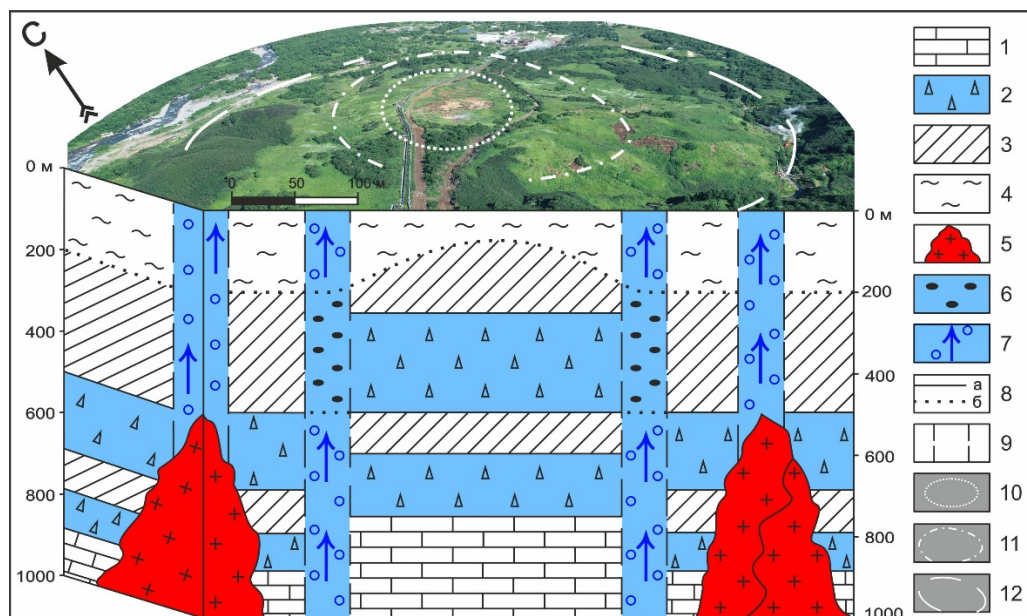


Рисунок 12. Концептуальная модель структуры района Верхне-Паужетского термального поля Паужетской гидротермальной системы [Феофилактос и др., 2020]. Использовано фото М.С. Чернова. 1 – фундамент структуры: вулканомиктовые песчаники; 2 – водовмещающие толщи пород: нижняя – агломератовые туфы, верхняя – псефитовые туфы; 3 – водоупорные горизонты: нижний – игнимбриты, верхний – туффиты; 4 – аргиллизированные породы; 5 – субвулканические интрузии; 6 – кварцадуляровые метасоматиты; 7 – зоны подъема и разгрузки газоводных флюидов и парогидротерм; 8 – литологические (а) и метасоматические (б) границы; 9 – зоны разрывных тектонических нарушений; 10 – границы термального поля; 11 – осевая линия зоны тектонических нарушений, оконтуривающей центральный приподнятый блок; 12 – условные границы тектоно-магматического поднятия.

Модель строения Паужетской гидротермальной системы. На основании проведенных исследований и обобщения данных по петрофизическим свойствам пород района выполнено грави-магнитное моделирование. Слоисто-блоковая модель верхней части разреза сопоставлена с геологическими данными, глубже 1 км - с результатами электромагнитных исследований. Выделено 4 неоднородных горизонта пород с контрастными петрофизическими свойствами, подробное описание которых дано в диссертационной работе. Рассмотрим концептуальную модель слоисто-блокового строения Паужетской гидротермальной системы (рис. 13). В структуре этого блока земной коры до глубины 15 км выделено 6 основных горизонтов, характеризующихся контрастными электромагнитными и грави-магнитными свойствами, и объяснена их геологическая природа. В кровле кристаллического фундамента - подошве меловых отложений выделен горизонт, характеризующийся высокой электропроводностью и, вероятно, являющийся зоной восходящего глубинного теплового потока. Высокая активность глубинного теплового потока в структуре Паужетской гидротермальной системы обусловлена раздробленностью западного склона хребта Камбальный на мелкие тектонические (тектоно-магматические) блоки и внедрением интрузий, образующих разветвленную систему субвулканических комплексов и

отдельных магматических тел. Участки повышенной тектоно-магматической активности, такие как районы Верхне- и Восточно-Паужетского термальных полей, служат субвертикальными каналами, связывающими глубинный тепловой поток с близповерхностными водоносными горизонтами.

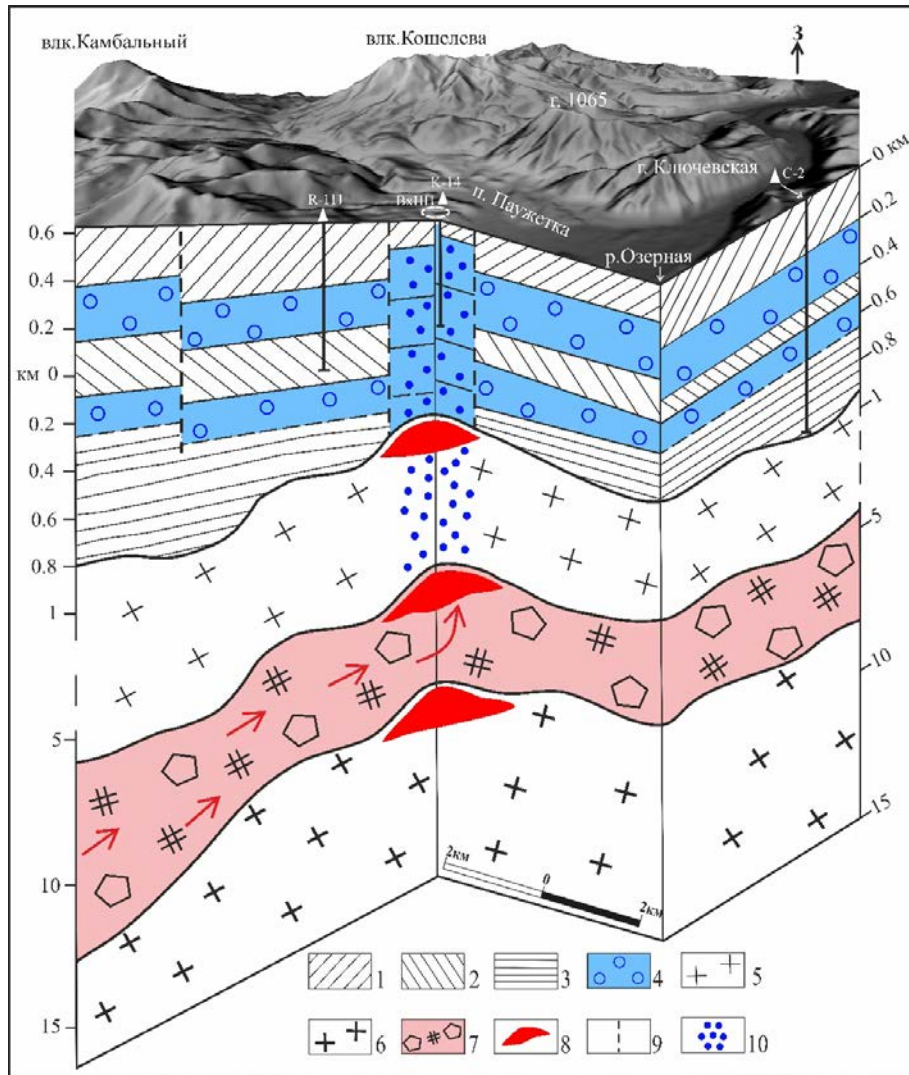


Рисунок 13. Концептуальная модель строения района Паужетской гидротермальной системы [Феофилактов и др., 2021]. 1-3 – Водоупорные горизонты в геологической структуре гидротермальной системы: 1 – верхний, представленный валунно-галечными аллювиальными отложениями Озерновского и Паужетского грабенных (в правой части модели), а также туффидами верхнепаужетской подсвиты и лавами Камбального вулканического хребта; 2 – средний, включающий магматические породы Ключевского комплекса и голыгинские игнимбриты района геотермального месторождения; 3 – нижний, отвечающий толще анавагйских песчаников. 4 – водовмещающий комплекс пород, состоящий из туфов паужетской свиты (верхний горизонт) и туфобрекчий аллейской серии (нижний горизонт); 5 – меловой фундамент; 6 – кристаллический фундамент; 7 – область разуплотненных горных пород в кровле кристаллического фундамента (подошве мелового фундамента), соответствующая предполагаемой зоне повышенной проводимости геотермального флюида; 8 – крупные интрузивные комплексы; 9 – субвертикальные разрывные нарушения; 10 – поток геотермального флюида, приуроченный к выступам мелового и кристаллического фундаментов и (или) к крупным интрузивным комплексам. Стрелками показано направление движения глубинного флюида - из-под основания Камбального хребта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены принципиально новые данные о строении Паужетской гидротермальной системы и одноименного геотермального месторождения. Геофизические исследования проведены методами электроразведки (ВЭЗ, ЕП, АМТЗ и МТЗ), гравиразведки, магнитразведки, микросейсмического зондирования и температурной съемки. Геолого-геофизические модели строения термальных полей, центральной части Паужетского месторождения и в целом Паужетской гидротермальной системы построены на основании комплексного анализа всех имеющихся опубликованных и фондовых геофизических, геологических и гидрогеологических данных. Основные результаты сводятся к следующему:

1. 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.

2. В районе Восточно-Паужетского термального поля, расположенного в центре кольцевого блока, термальные воды поступают к дневной поверхности по контактовым зонам субвулканического тела и по разрывным тектоническим нарушениям, образующимся между слоями и блоками пород с контрастными петрофизическими свойствами.

3. В центральной части Паужетского геотермального месторождения (в районе Верхне-, Нижне- и Южно-Паужетского термальных полей) структура зон циркуляции термальных вод определяется концентрически-зональным строением приподнятого тектоно-магматического блока и распределением неоднородностей среды - как первичных (магматического или вулканогенно-осадочного происхождения), так и образованных вследствие гидротермально-метасоматического изменения исходных пород.

4. Получены геофизические, геологические и геотермические данные, свидетельствующие о том, что формирование структуры зон разгрузки парогидротерм на Паужетском геотермальном месторождении продолжается в настоящее время.

5. Решен принципиальный вопрос об источнике теплового питания Паужетской гидротермальной системы: в рассмотренном блоке земной коры между кристаллическим и меловым фундаментами на глубине от 3-4 до 8-9 км выделен горизонт повышенной проводимости для теплового потока, восходящего из недр Камбального вулканического хребта.

6. Показано, что выступы мелового 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.

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

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах перечня ВАК:

1. **Феофилактов С.О.**, Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Денисов Д.К. Строение зоны разгрузки парогидротерм в Районе Верхне-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Геология и геофизика. 2020. № 9. т. 61. С. 1194—1214.
2. **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. 2017. № 5. С. 36–50.
3. **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.

Публикации в сборниках материалов научных конференций:

1. **Феофилактов С.О.** Электропроводность зон разгрузки парогидротерм Паужетского и Нижне-Кошелёвского геотермальных месторождений (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 219-222.
2. **Феофилактов С.О.**, Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А. Новые данные о строении Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка, Россия) // Материалы VII Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле (с участием иностранных специалистов) 17-21 ноября 2014 г. Новосибирск. 2014. С. 397.
3. **Феофилактов С.О.**, Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Денисов Д.К. Характеристика зоны разгрузки парогидротерм в центральной части Паужетского геотермального месторождения по геофизическим данным // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 175-178.
4. **Феофилактов С.О.**, Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Нуждаев А.А., Денисов Д.К. Строение Восточно-Паужетского термального поля на основании комплексных геофизических исследований // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и

- связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 299-310.
5. **Феофилактов С.О.**, Нуждаев И.А., Букатов Ю.Ю. Строение зон разгрузки парогидротерм Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) по геофизическим данным // XXVII Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» с участием исследователей из других стран Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 2017. С. 244-245.
 6. **Феофилактов С.О.**, Нуждаев И.А. Новые данные о распределении температур грунтов в районе Верхне-Кошелевских паровых струй // Материалы VII региональной молодёжной конференции «Исследования в области наук о Земле». Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга. 2009. С. 101-108.
 7. **Феофилактов С.О.**, Нуждаев И.А. Особенности глубинного строения Нижне-Кошелевского геотермального месторождения на основе сопоставления данных микросейсмического зондирования и гравиметрии // Материалы X региональной молодёжной конференции «Природная среда Камчатки». 12-13 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2011. С. 181-194.
 8. 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.
 9. Нуждаев И.А., **Феофилактов С.О.** Зимние магнитометрические исследования на Паужетском геотермальном месторождении: методика, краткие результаты // XII Региональная молодёжная научная конференция «Исследования в области наук о Земле». 25 ноября 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 75-84.
 10. Денисов Д.К., **Феофилактов С.О.**, Нуждаев И.А. Изучение геологического строения Паужетского и Нижне-Кошелевского геотермальных месторождений методом ВЭЗ (Южная Камчатка) // XI Региональная молодёжная научная конференция «Исследования в области наук о Земле». 26 ноября 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2013. С. 77-96.
 11. Букатов Ю.Ю., Абкадыров И.Ф., Нуждаев И.А., Рылов Е.С., **Феофилактов С.О.** Результаты высокоточных гравиметрических исследований на Верхне-Паужетском термальном поле. // Природная среда Камчатки // Материалы X региональной молодёжной научной конференции «Природная среда Камчатки». 12–13 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 2011. С. 51–60.

12. Букатов Ю.Ю., **Феофилакт** С.О., Нуждаев И.А., Денисов Д.К., Долбня Б.М. Результаты гравиметрических работ на Паужетском геотермальном месторождении (Южная Камчатка) // Материалы IX Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск. 2018. С. 82-84.
13. Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Рылов Е.С., **Феофилакт** С.О. Результаты высокоточных гравиметрических исследований на Верхне-Паужетском термальном поле. // Природная среда Камчатки // Материалы X региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 12–13 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2011. С. 51–60.
14. **Feofilaktov S. O.**, Rychagov S. N., Abkadyrov I. F., Bukatov Yu. Yu., I. A. Nuzhdaev New Data on Structure of Pauzhetsky Geothermal Deposit (South Kamchatka, Russia) // Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. 8 p.
15. **Feofilaktov S. O.**, Rychagov S. N., I. A. Nuzhdaev, Bukatov Yu. Yu., Denisov D.K. The Geological Structure Features of Hydrothermal Discharge Zones at Pauzhetsky Geothermal Deposit According to Geophysical Data (South Kamchatka, Russia) // Proceedings World Geothermal Congress 2021. Reykjavik, Iceland. 2021. 9 p.