

УДК 553.078.2

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЮЖНОЙ ГРУППЫ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ КАМБАЛЬНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА (КАМЧАТКА)

И.А. Нуждаев¹, С.Н. Рычагов¹, С.О. Феофилактов¹, Ю.Ю. Букатов¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийта д. 9, Россия

Аннотация: На основании комплексных структурно-геофизических исследований и обобщения геофизических, гидрогеологических, минералого-геохимических и др. данных показано, что термальные поля южной группы Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) входят в состав современной гидротермальной системы. Получены новые данные о строении зоны разгрузки парогидротерм до глубины около 300 м. Установлена структурная и гидродинамическая связь двух термальных полей этой группы. Предполагается единое тепловое питание геотермальной системы Камбального хребта, объединяющей все основные группы термальных полей.

Ключевые слова: Современная гидротермальная система, термальные поля, геофизические методы, структура, зона разгрузки парогидротерм, глубинное тепловое питание

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL MODELING OF THE HYDROTHERMAL SYSTEM STRUCTURE OF THE SOUTHERN GROUP OF THERMAL FIELDS OF THE KAMBALNYI VOLCANIC RANGE (KAMCHATKA)

I.A. Nuzhdaev¹, S.N. Rychagov¹, S.O. Feofilaktov¹, Yu. Y. Bukatov¹

Abstract. Based on complex structural-geophysical investigations and generalization of geophysical, hydrogeological, mineralogical and geochemical and other data, it is shown that thermal fields of the southern group of Kambalny volcanic range (South Kamchatka) are a part of the modern hydrothermal system. New data on the structure of the steam-hydrothermal discharge zone to a depth of about 300 m were obtained. Structural and hydrodynamic connection of two thermal fields of this group is established. A single thermal supply of the Kambalny range geothermal system, uniting all major groups of thermal fields, is assumed.

Keywords: Modern hydrothermal system, thermal fields, geophysical methods, structure, steam-hydrothermal unloading zone, deep thermal supply.

ВВЕДЕНИЕ

Современные гидротермальные системы, несмотря на длительную историю изучения, остаются объектами пристального внимания ученых всего мира из различных областей знаний [Басков, Суриков, 1989; Ефимов, Ефимова, 2007; Иванов, 1977; Посохов, Толстихин, 1977; Сахаров и др., 2020;

Сурмаажав, 2020; Alcalá, Custodio, 2008; Kralj, Kralj, 2000; WGC, 2020+1]. В геологии неослабевающий интерес к ним обусловлен, прежде всего, огромной ролью потоков восходящих газо-водных флюидов в становлении и преобразовании земной коры океанов, зон субдукции, вулканических островных дуг и даже древних платформ [Богданов, 1997; Иголкина, 2002; Кононов, Поляк, 1982; Муслимов и др., 1980; Рычагов, 2002, 2003; Христофорова и др., 1999; Bellani et al., 2004; Benz et al., 1992; Bertani et al., 2005; Gianelli et al., 1997; Lachenbruch, Sass, 1980]. Большое значение в конвективном переносе тепла и вещества играют сквозькоровые гигантские газо-гидротермальные системы [Поздеев, Нажалова, 2008; Поляк и др., 1979; Рычагов, 2014; Рычагов и др., 2018; Shigeno, 2000; Stimac et al., 2001; Uchida et al., 1996; Verdoya et al., 2005]. В областях современного и четвертичного вулканизма такие системы локализуются в геотермальных районах, приуроченных к центральным частям долгоживущих вулканогенно-рудных центров [Долгоживущий ..., 1980; Леонов, 2001; Прогнозная ..., 1977]. Одним из таких центров является Паужетский (Паужетско-Камбально-Кошелевский), расположенный на южной оконечности Камчатки [Белоусов, 1978; Рычагов, 2003; Сугробов, 1982].

Южная Камчатка представляет собой один из наиболее перспективных регионов для изучения сквозькоровых гигантских газо-гидротермальных систем в связи с ее особым геодинамическим положением (приуроченностью к зоне сочленения трех вулканических поясов и стыку региональных тектонических блоков - сегментов камчатского и курильского секторов островной дуги), широким проявлением гидротермальных метаморфических и современных геотермальных процессов. В период наиболее активного изучения гидротермальных систем Камчатки (1960-80-ые годы) выявлено и детально изучено около 30 крупных гидротермальных систем, разбурено более 10 геотермальных месторождений, которые могут обеспечить работу электрических и тепловых станций общей мощностью до 1500 МВт в расчете на 100 лет эксплуатации [Стратегия ..., 2001; Сугробов и др., 2005]. При этом остались не решенными основные вопросы, имеющие принципиальное значение для исследования гидротермальных систем и эксплуатации геотермальных месторождений: каковы генезис и местоположение источника тепла, что собой представляет структура зон восходящего теплового потока, во многих случаях не ясна природа и строение зон разгрузки парогидротерм. Вероятно, эти проблемные вопросы являются одной из причин крайне низкого использования геотермального потенциала на Камчатке и в целом в России, в то время как во многих странах мира наблюдается устойчивый рост потребления геотермальных ресурсов в электро- и теплоснабжении, сельском хозяйстве, развитии туризма, бальнеологии и др. видах деятельности человека [WGC, 2020+1].

Камбальный вулканический хребет считается одной из крупнейших геотермальных систем Камчатки, по выносу тепла она сопоставима с Долиной гейзеров, Кошелевским и Семячинским вулканическими массивами, Мутновской и др. гидротермальными системами [Гидротермальные ..., 1976; Сугробов, 1982]. На первом этапе исследований термоаномалий Камбального хребта выделены три группы термальных полей, обозначены основные термопроявления, изучен состав термальных вод и конденсата пара [Нехорошев, 1959; Белоусов и др., 1976]. В дальнейшем коллективом авторов получены данные о строении термальных полей, характере и направленности изменения первичных горных пород в зонах разгрузки парогидротерм, структуре термоаномалий на глубину до первых сотен метров [Нуждаев и др., 2019, 2023; Рычагов и др., 2020, 2021; Феофилактов и др., 2020; Фролова и др., 2020]. Неожиданное эксплозивное извержение Камбального вулкана [Гирина и др., 2017], замыкающего одноименный хребет с юга постройки, стимулировало получение первых сведений о магматических и, вероятно, геотермальных флюидопроводящих структурах на глубине до 10 - 15 км [Komzeleva et al., 2021]. На основании изучения продуктов извержения, а также сейсмических и геоакустических исследований сделано заключение о большой роли газо-гидротермальных процессов в активизации вулкана Камбальный [Рычагов и др., 2017; Фирстов, Лобачева, 2018]. Более того, показано, что именно в основании геологического разреза Камбального вулканического хребта расположена область теплового питания Паужетской гидротермальной системы, а, по-видимому, и многих геотермальных проявлений этого района [Феофилактов и др., 2021]. Все это послужило основанием для проведения дополнительных комплексных геолого-геофизических работ, особенно в районе южной группы термальных полей Камбального хребта, приближенных к одноименному вулкану, с целью определения структуры гидротермальной системы, условий питания и разгрузки термальных вод.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район приурочен к длительноживущему вулканогенно-рудному центру южной оконечности Камчатки [Прогнозная ..., 1977]. Основные геотермальные аномалии и месторождения района локализуются в крупной (~35×50 км) овально-кольцевой вулканотектонической структуре типа аккумулятивно-сводового поднятия [Долгоживущий ..., 1980], (рис. 1). Время заложения структуры относится к раннему миоцену. В центральной части поднятия вследствие длительной интенсивной тектоно-магматической деятельности (от миоцена по голоцен) образовалась вулканотектоническая депрессия [Белоусов, 1978; Долгоживущий ..., 1980] или кальдера по [Давыдова и др., 2022] размером 20×25 км. Границы кальдеры выделяются по распространению вулканогенно-осадочных пород (туфов и туффитов паужетской свиты) внутри структуры и голыгинских игнимбритов по ее обрамлению [Структура ..., 1993; Давыдова и др., 2022]. К раннему голоцену относится образование кальдеры Курильского озера: в результате многоактных взрывных процессов при подъеме к дневной поверхности кислых расплавов сформировалась воронкообразная структура (глубина современной впадины достигает 130 м) и мощные отложения пемз дацитового состава вокруг озера [Пономарева, 2010].

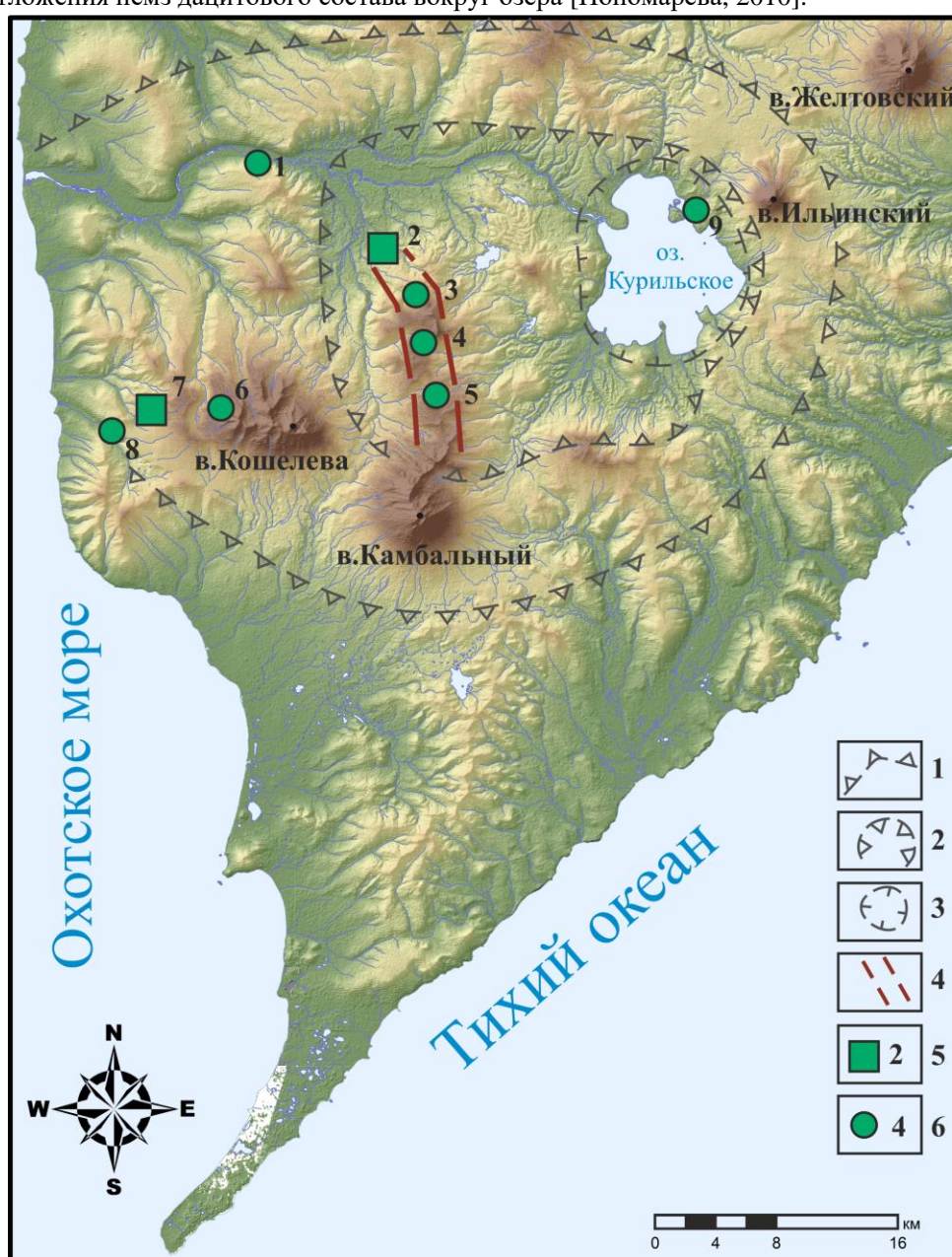


Рис. 1. Основные структуры Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района Южной Камчатки: 1 – Паужетская вулканотектоническая структура типа аккумулятивно-сводового поднятия, по

(Долгоживущий ..., 1980); 2 – Паужетская вулcano-тектоническая депрессия; 3 – кальдера Курильского озера; 4 – предполагаемая зона теплового питания термоаномалий Камбального вулканического хребта; 5 – разведанные геотермальные месторождения (2 - Паужетское, 7 - Нижне-Кошелевское); 6 – крупные термопроявления (1 - Первые Горячие Ключи, 3 - Северо-Камбальное, 4 - Центрально-Камбальное, 5 - Южно-Камбальное, 6 - Верхне-Кошелевское, 8 - Сивучинское).

Камбальный вулканический хребет представляет собой резургентное тектоно-магматическое поднятие в структуре Паужетской кальдеры, вытянутое до 20 км в субмеридиональном направлении (см. рис. 1). Хребет, с юга на север, состоит из трех крупных интенсивно разрушенных стратовулканов: андезибазальтового Термального, андезитового Разваленного и базальтового Черные Скалы [Белоусов, 1978; Долгоживущий ..., 1980]. Возраст вулканов близкий - от нижне- до среднелейстоценового. Крупные постройки осложнены паразитическими вулканами кислого, среднего и основного составов, а также экструзиями дацитов и андезитов, и воронками взрывов. Предполагается эволюция единого глубинного магматического очага или серии периферических очагов с юга на север структуры [Долгоживущий ..., 1980]. Но в раннем голоцене образовался базальтовый современный действующий вулкан Камбальный [«шлаковый конус», по Сывороткину, 1993], по-видимому, не имеющий прямое отношение к эволюции одноименного хребта. На это, помимо возраста, указывает положение вулкана в Паужетской вулcano-тектонической структуре (см. рис. 1) и ряд других признаков: в частности, выделение субвертикальной флюидопроводящей зоны непосредственно под вулканом, не связанной с геотермальной зоной Камбального хребта [Komzeleva et al., 2022]. Мы полагаем, что образование Камбального вулкана обусловлено активизацией в раннем голоцене тектоно-магматических процессов вдоль южно-камчатского глубинного разлома северо-западного простирания [Апрелков и др., 1979], в зоне влияния которого расположен также Кошелевский вулканический массив [Рычагов, 2014].

Вдоль осевой зоны хребта Камбальный выделяются три группы термальных полей: Южно-, Центрально- и Северо-Камбальная [Нехорошев, 1959; Белоусов и др., 1976]. Каждая группа включает три и более термальных поля размером от 100 м² до 0.5 км². Строение термальных полей Камбального хребта принципиально схоже: на прогретых грунтах разгружаются многочисленные парогазовые струи, формируются мелкие бессточные грязеводные котлы и отдельные водные источники. Это свидетельствует о наличии мощной зоны пара в структуре хребта. Такой тип разгрузки тепла наиболее характерен для Центральной и Северной групп термальных полей. Паужетская гидротермальная система и одноименное геотермальное месторождение, вероятно, структурно и гидродинамически связано с Камбальным вулканическим хребтом [Левина и др., 1980; Структура ..., 1993; Феофилактов и др., 2021]. Таким образом, Камбальный вулканический хребет вмещает крупную геотермальную систему, по-видимому, имеющую единый глубинный источник теплового питания для близповерхностных термопроявлений.

Южная группа термальных полей, которой посвящена настоящая работа, не случайно вызывает повышенный интерес гидрогеологов, геологов, петрологов, минералогов и геохимиков. Она приурочена к вулкану Термальный. Здесь разгружается мощный тепловой поток [Белоусов и др., 1976; Сугробов, 1982], горные породы изменены до вторичных кварцитов, опалитов и аргиллизитов [Фролова и др., 2020]; отмечаются источники глубинных термальных вод щелочного состава, обогащенные редкими и др. металлами [Рычагов и др., 2020; Структура ..., 1993]); термальные воды и минеральные осадки характеризуются высокими содержаниями аммония, а газы - азотом вулканического происхождения [Нехорошев, 1959; Сережников и др., 1982]; в зоне аргиллизации пород образуются минеральные ассоциации с фосфатами редкоземельных элементов [Рычагов и др., 2021]. Южная группа включает три термальных поля (рис. 2).

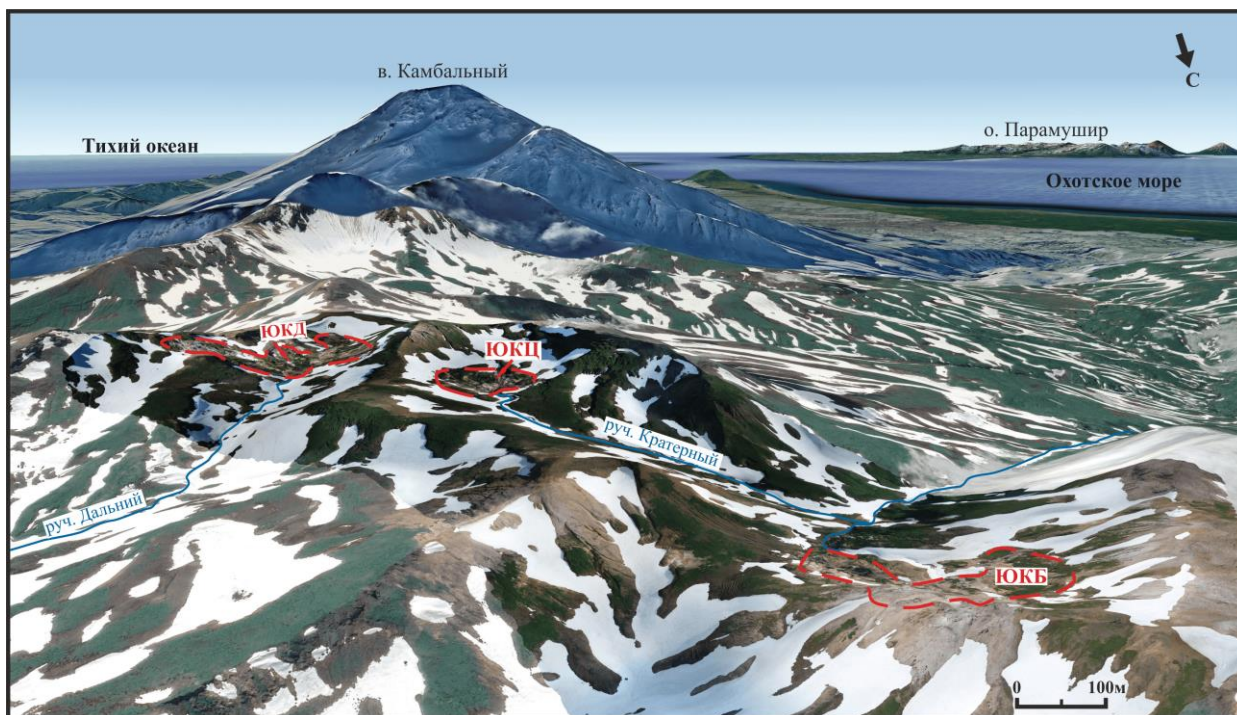


Рис. 2. Схема расположения термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта. Красным пунктиром показаны границы термальных полей по 20°C изотерме: ЮКБ - Южно-Камбальное Ближнее, ЮКЦ - Южно-Камбальное Центральное, ЮКД - Южно-Камбальное Дальнее.

Южно-Камбальное Дальнее термальное поле (ЮКД) расположено в U-образной долине ручья Дальний, истока р. Этамынк, и вытянуто на протяжении 1200-1500 м. Водоразделы и борта ручья сложены лавовыми и пирокластическими потоками андезитов и андезибазальтов, измененных до вторичных кварцитов, опалитов и гидротермальных глин. Вторичные кварциты и опалиты образуют крупные площадки и серные бугры на участках разгрузки старых (исчезнувших в настоящее время) термальных источников. Интенсивность аргиллизации пород возрастает по направлению от водоразделов к ложу ручья. Термопроявления представлены: парящими грунтами (температура на глубине 0.8 м достигает 107°C), парогазовыми струями (средние температуры 94-98°C, максимальные 120°C), грязеводными и водными источниками (температура не превышает 98°C), пульсирующими котлами. Последние, а также наиболее крупные насыщенные газом водные источники тяготеют к ложу ручья, что служит дополнительным критерием выделения проницаемой для флюида тектонической зоны вдоль руч. Дальний.

Южно-Камбальное Центральное термальное поле (ЮКЦ) локализовано в кольцевой морфоструктуре диаметром ~1000–1200 м, представляющей собой, по-видимому, эродированный кратер одного из конусов вулкана Термальный. По периферии морфоструктуры протягивается узкий гребень, сложенный лавами андезитов и андезибазальтов, незначительно подверженных гидротермально-метасоматическим изменениям. Опалиты и вторичные кварциты прослеживаются в бортах морфоструктуры, термальное поле сложено аргиллизитами [Фролова и др., 2020]. Общие размеры термального поля ~ 600×600 м, центральная часть (~200×300 м) является собственно современной термоаномалией. Принципиально она имеет такое же строение, как и ЮКД, но отличается наличием кипящих озер и пульсирующих источников с щелочными термальными водами. На относительно спокойных термальных площадках грязеводные котлы с кислой водой перемежаются с газоводными чистыми источниками с нейтральными и слабощелочными растворами [Рычагов и др., 2020]. Получены прямые данные о разгрузке на ЮКЦ глубинного щелочного флюида [Рычагов и др., 2021].

Южно-Камбальное Ближнее термальное поле (ЮКБ) расположено в 2.5 км к северу от ЮКЦ и приурочено к глубоко врезанной котловине правого притока руч. Кратерный (см. рис. 2). Поле вытянуто с запада на восток до 600 м и сужается к югу до 100 м. Гребень морфоструктуры сложен перемежающимися блоками андезитов и дацитов (дацитов - риолитов ?), размер блоков в поперечнике

составляет от 50-100 до 250-300 м. Среди этих блоков выделяется экструзия дацитов (риолитов ?) "Цветные Скалы", породы апикальных частей которой полностью изменены в опалиты и вторичные кварциты. По контактовым зонам экструзии и по субвертикальным трещинам между ее внутренними блоками происходит интенсивное парение. Основные термопроявления ЮКБ представлены горячими (до 105°C) грунтами и мелкими парогазовыми струями (температуры не выше 98°C). Среди водных источников преобладают грязеводные котлы с кислыми растворами, но ряд газоводных источников с чистой водой имеют рН до 7.5-8.5 единиц. Это может свидетельствовать о возможном влиянии глубинных щелочных термальных вод на зону разгрузки ЮКБ, как и на ЮКЦ.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАМБАЛЬНОМ ХРЕБТЕ

С точки зрения геофизических исследований Камбальный вулканический хребет изучен крайне слабо. В связи с труднодоступностью наземные геофизические работы до последнего времени не проводились. Известны аэрогеофизические съемки гравитационного и магнитного полей, выполненные с целью выявления структурных особенностей строения полуострова Камчатка, установления связей между вулканизмом и тектоникой. Исследуемый нами район, в т.ч. Камбальный хребет, покрыт аэромагнитной съемкой масштаба 1:1 000 000 под руководством Л.А. Ривоша [Ривош, 1962]. На карте аномального магнитного поля на фоне положительной аномалии, вытянутой в меридиональном направлении на протяжении всего хребта Камбального, выделяется почти изометричный максимум магнитного поля, смещенный к югу от вершины вулкана Камбальный. В гравитационном поле в районе Камбального хребта выделена локальная отрицательная аномалия, образование которой связывается в общем с формированием Паужетской вулкано-тектонической депрессии [Литасов, Важеевская, 1991].

Неожиданное эксплозивное извержение вулкана Камбальный в 2017 г. [Гирина и др., 2017; Рычагов и др., 2017; Фирстов и др., 2018] активизировало постановку геофизических исследований в этом районе. На основании сейсмической томографии, выполненной совместно сотрудниками ИНГГиГ СО РАН и ИВиС ДВО РАН, получены данные о строении верхней части земной коры в районе вулкана и южной части хребта. Под вулканом выделена субвертикальная флюидопроводящая зона, погружающаяся в магматический очаг, расположенный на глубине 7-10 км от дневной поверхности [Komzeleva et al., 2021]. Севернее, уже в структуре Камбального вулканического хребта выделена другая крупная зона, насыщенная флюидом, но как считают авторы статьи, геотермального происхождения. Таким образом, эти исследователи полагают, что выделенные флюидопроводящие зоны не связаны друг с другом и имеют различную природу - магматическую и геотермальную.

Авторским коллективом на основании магнитометрической съемки, вертикальных электрических зондирований, гравиразведки и термометрии получены первые данные о строении верхних горизонтов термальных полей южной группы [Нуждаев и др., 2019, 2022, 2023]. В районе ЮКЦ выделяется близповерхностная водонасыщенная область (локальный геотермальный резервуар ?), предполагается гидродинамическая связь двух термальных полей [Феофилактов и др., 2020]. На основании анализа магнитометрических данных показано, что термальные поля ЮКД, ЮКЦ и ЮКБ характеризуются пониженным модулем магнитной индукции T по сравнению с Паужетским и Нижне-Кошелевским геотермальными месторождениями, что свидетельствует о более интенсивном изменении горных пород Камбального хребта гидротермально-метасоматическими процессами, по-видимому, в результате длительного воздействия конвективного теплового потока [Нуждаев и др., 2023].

В районе южной группы термальных полей Камбального вулканического хребта проведены исследования по определению физических и физико-механических свойств горных пород и продуктов их гидротермального изменения [Фролова и др., 2020]. Исходные породы представлены андезибазальтами темно-серого цвета с порфировой структурой. Неизмененные андезибазальты плотные ($\rho = 2.71 \text{ г/см}^3$), низкопористые ($n = 6\%$), с высокими значениями показателей упругих ($V_p = 5.2 \text{ км/с}$, $E_y = 54.8 \text{ ГПа}$) и прочностных ($R_c = 118 \text{ МПа}$) свойств. Данные породы также отличаются высокими значениями магнитной восприимчивости ($\chi = 28.8 \cdot 10^{-3} \text{ СИ}$), что обусловлено присутствием в их составе титаномагнетита и пироксенов. Сильно измененным андезибазальтам характерен желтовато-бежевый цвет, что характерно для кислотного выщелачивания - разрушения темноцветных

минералов с выносом железа, алюминия и др. элементов. Минералы кремнезема полностью замещают основную массу породы и большую часть плагиоклазов. Изменения носят псевдоморфный характер, форма кристалла остается сохранной, а минеральный состав меняется. Уменьшается плотность ($\rho = 1.86 \text{ г/см}^3$) и показатели упругих ($V_p = 2.6 \text{ км/с}$, $E_y = 9.6 \text{ ГПа}$) и прочностных ($R_c = 15 \text{ МПа}$) свойств. Магнитная восприимчивость резко снижается ($\chi = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ СИ}$). Конечными продуктами кислотного выщелачивания на термальных полях являются серные опалиты, вторичные кварциты и гидротермальные глины. Результаты этих исследований нами непосредственно учитывались при обработке результатов, особенно при гравимагнитном моделировании.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Магнитная съемка была первым наземным геофизическим методом, выполненным авторами на объектах исследований. Использовался магнитометр GSM-19W на эффекте Оверхаузера (GEM Systems, Канада). Для отслеживания суточных вариаций магнитного поля использовались данные геофизической обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН. Магниточувствительный датчик располагался на постоянной высоте 210 см от поверхности наблюдения. Пешеходной магнитной съемкой покрыта площадь 2.8 км^2 , с выходом за $20 \text{ }^\circ\text{C}$ изотерму на всех термальных разгрузках Южно-Камбальной группы. Всего выполнено 14500 рядовых замеров, среднеквадратическая погрешность съемки составила $\pm 6 \text{ нТл}$.

Каппаметрия выполнялась совместно с магнитной съемкой на той же площади. Были выбраны кондиционные обнажения пород, произведен замер в трех плоскостях и взято среднее значение. Съемка выполнялась каппаметром КТ-6 (SatisGeo, Чехия), магнитная восприимчивость измерена в 55 пунктах.

Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) выполнены симметричной четырехэлектродной расстановкой Шлюмберже (AMNB). Максимальный полуразнос питающей линии (AB/2) изменялся в пределах 200-450 м. Измерения проведены для ЮКЦ в 16 точках по двум взаимно перпендикулярным профилям: А-О-Б с юго-запада на северо-восток и В-О-Г с северо-запада на юго-восток; длина составила 840 м и 465 м, соответственно. Расстояния между пикетами на термальной площадке составили 50 м, за ее пределами порядка 100 м. Также ВЭЗ выполнены в 30 пунктах по секущему профилю через всю Южно-Камбальную группу: Д-О-Е длиной 3070 м (**рис. 3**). На каждом пункте проведено от 15 до 18 измерений, что позволило получить детальные кривые зондирования. Использовалась современная электроразведочная аппаратура: многофункциональный измеритель МЭРИ-24 и электроразведочный генератор АСТРА-100 (ООО «Северо-Запад», Россия). Камеральная обработка данных проведена в специализированном программном пакете IPI2win (ООО «Геотех», Россия). Точность измерений $\leq 3 \%$ по одному пункту зондирования. Значение невязки между теоретической и практической кривыми ВЭЗ $\leq 5 \%$.

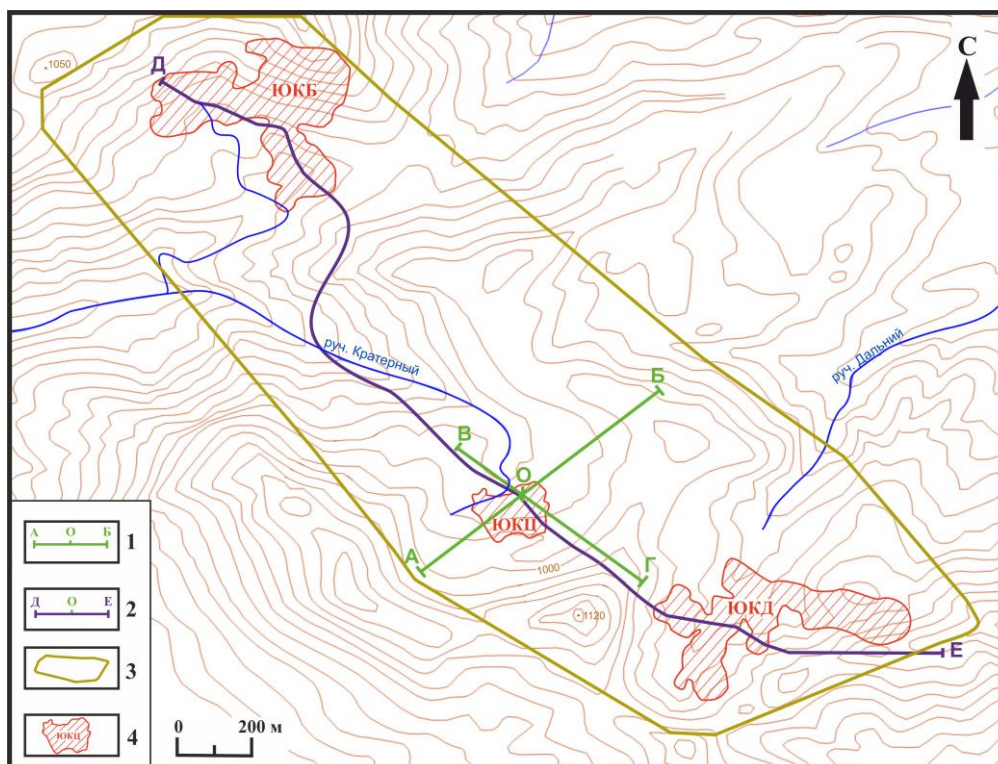


Рис. 3. Схема расположения геофизических исследований, профили и пункты зондирования. 1 – Профиль ВЭЗ и гравиразведочных исследований для площади ЮКЦ; 2 – Профиль ВЭЗ через южную группу Камбальных термальных полей; 3 – граница площадной магнитной съемки и капшметрии; 4 – Площадь термальных полей по 20°C изотерме.

Гравиметрическая съемка проведена автоматическим микропроцессорным гравиметром CG-5 Autograv (Scintrex, Канада). Диапазон измерений прибора > 7000 мГал, разрешающая способность при снятии показаний 0.001 мГал. Геодезическое обеспечение осуществлялось GPS станциями Leica GR 10 с антеннами AR 10. Одна станция использовалась в качестве базовой, другая перемещалась по профилю. Время записи на точках ≥ 15 мин. Гравиметрические наблюдения выполнены в 23 пунктах по профилю А-О-Б длиной 930 м и в 19 пунктах по профилю В-О-Г длиной 715 м. Точность определения координат пунктов исследования в плане составляла 0.04 м, по высоте 0.05 м. Поправка за влияние рельефа местности вводилась во все наблюдаемые значения g_n , максимальное значение 1.006 мГал, минимальное 0.18 мГал, среднее для всей съемки 0.4 мГал.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитометрические исследования. Построена детальная карта распределения аномального магнитного поля ΔT_a для территории Южно-Камбальной группы термальных полей (рис. 4 а). Среднее значение наблюдаемого магнитного поля 50300 нТл. Диапазон изменения ΔT_a от -1000 до 1300 нТл. В целом, термальные поля характеризуются пониженным модулем магнитной индукции Т по сравнению с Паужетским и Нижне-Кошелевским геотермальными месторождениями [Нуждаев и др., 2023]. Это свидетельствует о более интенсивном изменении горных пород Камбального хребта гидротермально-метасоматическими процессами, по-видимому, в результате 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 типичным является прямая связь температурного поля с отрицательными аномалиями ΔT_a вследствие аргиллизации пород и разрушения ферромагнитных минералов [Феофилактов и др., 2017, 2020]. В то же время, термальные поля ЮКЦ и ЮКД пространственно тяготеют к крупной отрицательной магнитной аномалии ΔT_a , что может

свидетельствовать о их приуроченности к одной геологической структуре, проницаемой для гидротермального флюида.

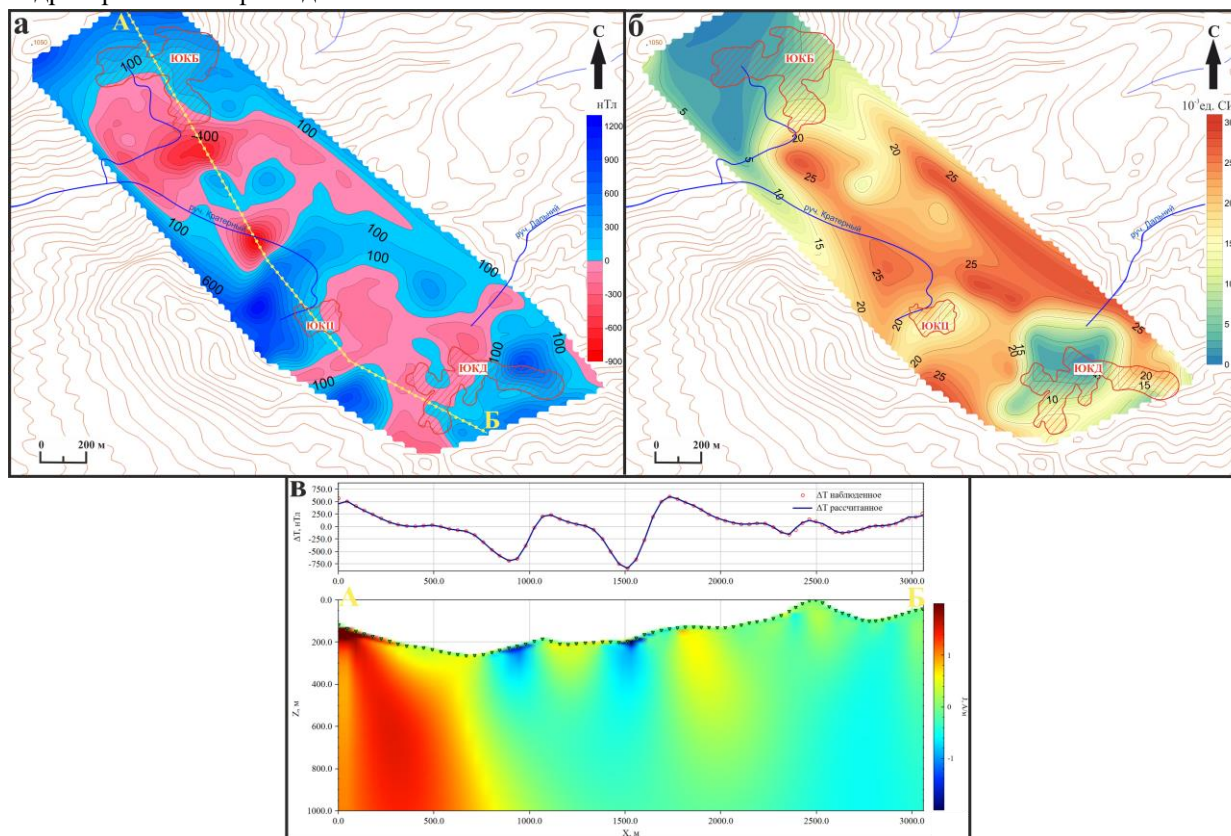


Рис. 4. а) Карта аномалий магнитного поля ΔT_a для группы Южно-Камбальных термальных полей; **б)** Карта распределения значений магнитной восприимчивости для группы Южно-Камбальных термальных полей; **в)** разрез по профилю А-Б построенный по результатам двумерного сеточного моделирования в ПО «GravMagInv».

Для выявления локальных и региональных магнитных аномалий в программе TGMF-Square (МГУ, Россия) произведен пересчет полученных значений магнитного поля в нижнее и верхнее полупространство на -500 м и 500 м, соответственно. В верхнем полупространстве выделяется отрицательная аномалия, территориально относящаяся к экструзивному комплексу дацитового состава "Цветные Скалы". Эта аномалия, по-видимому, имеет региональный характер. Аномалий, приуроченных к термальным полям в верхнем полупространстве не выявлено. При пересчете в нижнее полупространство выделяются три отрицательные изометричные аномалии, вытянутые в северо-западном направлении и пространственно связанные с термальными полями Южно-Камбальной группы. Таким образом, эти отрицательные магнитные аномалии являются локальными на исследуемом участке и, по-видимому, образовались в следствии аргиллизации пород под действием гидротермального флюида.

На карте распределения магнитной восприимчивости (рис. 4 б) в районе ЮКБ и ЮКД выделяются области, близкие к нулевым значениям: на этих участках термальных полей андезиты преобразованы в гидротермальные глины вследствие разгрузки здесь термальных вод и конденсата кислого пара. Известно, что под действием кислых и слабокислых растворов ($pH < 5$), насыщенных сероводородом, углекислым и другими газами, происходит аргиллизация пород и изменение их физико-механических свойств: в частности, аргиллизиты практически полностью утрачивают намагниченность вследствие разложения темноцветных (пироксенов и амфиболов) и рудных (магнетита, титаномагнетита и ильменита) минералов [Soengkono, Hochstein, 1996]. Основной механизм изменения магнитной восприимчивости пород заключается в выщелачивании ферромагнитных минералов кислыми водами, проникающими в породу по системе микротрещин и открытых пор [Ладыгин и др., 2014].

В программном обеспечении GravMagInv («ЛОЛГЕО», Россия) [Лыгин и др., 2022; Чепиго, 2022] выполнено двумерное сеточное моделирование по профилю А-Б на глубину до 1000 м (рис. 4 в).

Повышенные значения намагниченности относятся к экструзивному комплексу "Цветные Скалы", подтверждается региональный характер аномалии в этой области. ЮКБ характеризуется значениями намагниченности от 0 до 1 А/м, что объясняется приуроченностью термального поля к наиболее прогретым апикальным частям экструзии. Такие же значения характерны и для ЮКЦ: намагниченные породы по результатам моделирования распространяются на глубину до 500 м. Для района ЮКД каких-либо особенностей в распределении значений намагниченности не выявлено, вероятно, аномалии на этом участке носят поверхностный характер.

Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) выполнены по профилю, пересекающему всю группу термальных полей (рис. 5). В нижней части рисунка представлены типичные наблюдаемые кривые ВЭЗ для термальных полей Южно-Камбальной группы (обозначены пунктирной линией) и для исследуемого района за пределами 20 °С изотермы. Полученные кривые распределения кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) относятся к типу «КН–НКН». Приповерхностные горизонты геологического разреза характеризуется высокими значениями ρ_k , для района исследований на глубину электрическое сопротивление резко снижается. Минимальные значения ρ_k достигаются на разносах $AB/2 = 50-120$ м. Кривые зондирования на термальных полях отличаются низкими значениями ρ_k в верхней части разреза (первые единицы и десятки Ом·м). В интервале разносов $AB/2 = 20-80$ м наблюдается перегиб кривых, который указывает на наличие промежуточного горизонта пород с повышенным значением сопротивлений, мощность и глубина которого варьирует по разрезу.

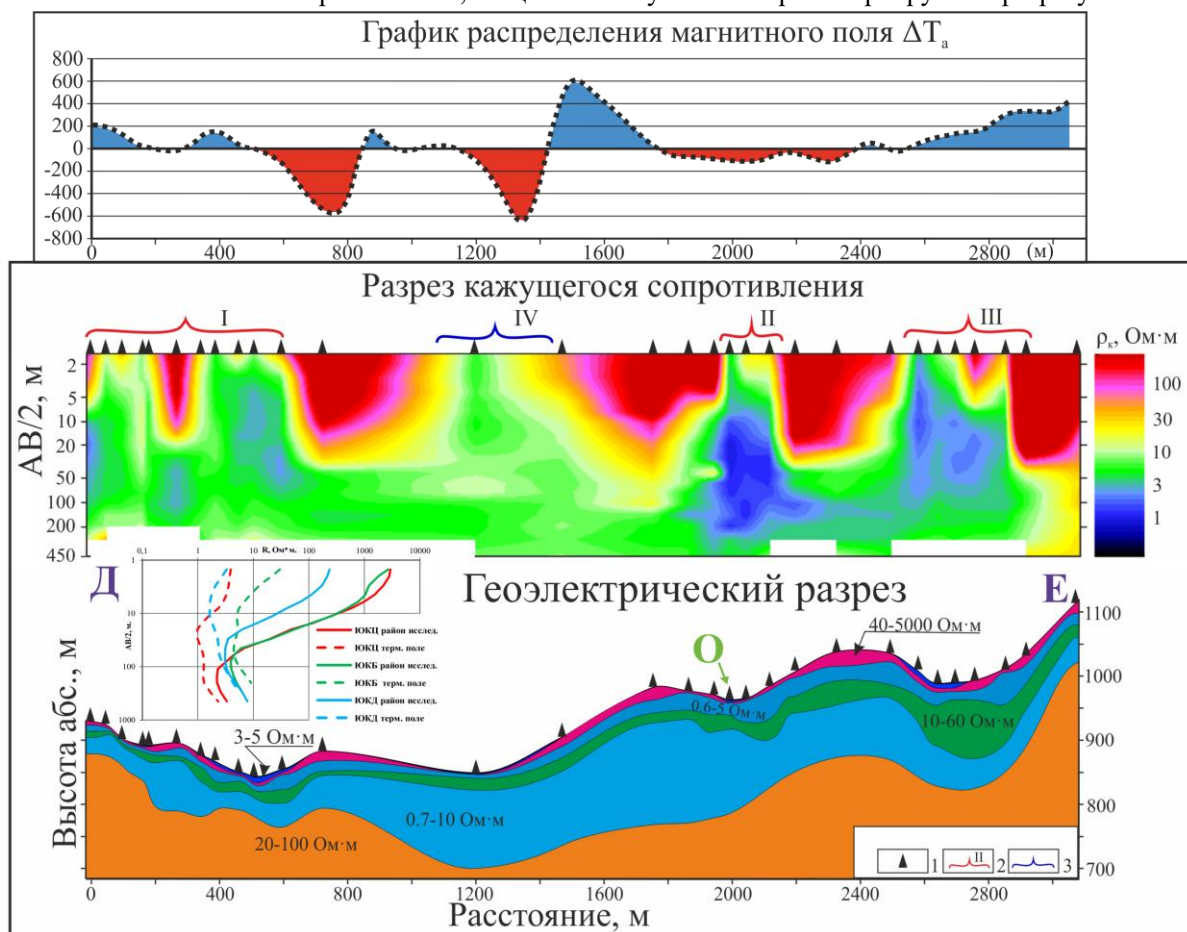


Рис. 5. График распределения значений ΔT_a по профилю Д-О-Е (вверху рисунок), согласованный с разрезами кажущегося сопротивления и геоэлектрическим, полученными по результатам ВЭЗ. 1 – точки ВЭЗ; 2 – участки термальных полей по изотерме 20 °С, I – ЮКБ, II– ЮКЦ, III – ЮКД; 3 – долина ручья Кратерного с обозначением его русла IV. В нижней части рисунка представлены типичные наблюдаемые кривые ВЭЗ для термальных полей Южно-Камбальной группы (обозначены пунктирной линией) и для исследуемого района за пределами 20 °С изотермы.

Построены псевдо- и геоэлектрические разрезы для района исследований. Пониженными значениями сопротивлений, менее 1 Ом·м, характеризуются участки основных разгрузок термальных

вод на ЮКД и ЮКЦ, что отчетливо видно на разрезе кажущегося сопротивления и по кривым зондирований. ЮКБ характеризуется более высокими значениями удельного электрического сопротивления (у.э.с) - до 5 Ом·м. На этих термальных полях выделяется один общий горизонт пород с низкими значениями удельного электрического сопротивления (0.6-10 Ом·м). Горизонт имеет максимальную мощность до 200 м в русле ручья Кратерного (IV) и осложнен промежуточным слоем с повышенными значениями у.э.с. (10-60 Ом·м). Мощность этого слоя изменяется по разрезу и максимальна под термальными полями. Вероятно, это обусловлено гидротермальными процессами - высоким насыщением пород минерализованными термальными водами. Отмечаются чашеобразные области погружения проводящего горизонта под всеми выделяемыми на разрезе структурами. Эти области могут представлять собой локальные геотермальные резервуары.

Проведено сопоставление данных магнитометрической съемки и результатов электрических зондирований по профилю Д-О-Е, пересекающему все термальные поля. На графике распределения магнитного поля ΔT_a видно, что для ЮКБ (область I) характерны слабо положительные значения, далее за границей двадцатиградусной 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 области IV – долина руч. Кратерного. По-видимому, здесь проходит структурная граница между гидротермально-метасоматическими породами и неизменными или слабо измененными андезитами. Для ЮКЦ характерны слабо отрицательные значения ΔT_a (область II), переходящие в положительные значения ΔT_a к участку ЮКД (область III). На разрезе кажущегося сопротивления 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. Данный вопрос относительно третьего термального поля (ЮКБ) остается открытым.

Более подробно методом ВЭЗ изучено ЮКЦ (рис. 6). Разрезы кажущегося сопротивления и геоэлектрические разрезы построены по двум профилям (см. рис. 3). Геоэлектрический разрез относится к типу Н и осложнен промежуточным горизонтом повышенного сопротивления (до 15 Ом·м, на рис. 6 показан зеленым цветом). Разрез представлен в двух плоскостях следующими слоями.

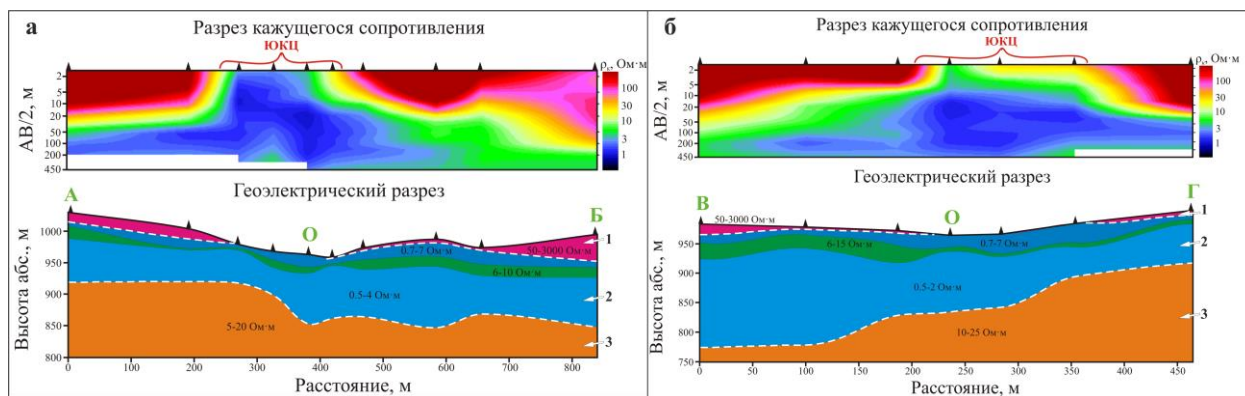


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по данным ВЭЗ: **а)** по профилю А-О-Б; **б)** по профилю В-О-Г (см. рис. 3). 1,2,3 - основные выделенные горизонты. Цифрами на геоэлектрическом разрезе показан диапазон изменения значений у.э.с. для каждого горизонта.

1. Приповерхностный горизонт пород с высокими значениями у.э.с. 50-3000 Ом·м, мощностью от нуля в районе разгрузки термальных вод до 15-40 м за ее пределами. К породам этого горизонта относятся неизменные и слабо измененные андезиты.

2. Горизонт пород с сопротивлением 0.7-7 Ом·м, мощностью от 70 м в краевых частях профиля до 140 м в его центральной части. Он разделен горизонтом пород с повышенными значениями у.э.с. (6-15 Ом·м) мощностью 3-20 м. Геоэлектрический горизонт включает в себя гидротермально измененные разности пород.

3. Горизонт основания разреза с значениями у.э.с. 5-25 Ом·м. Он соответствует, по-видимому, относительно слабо влагонасыщенным породам.

Для пород южной группы термальных полей Камбального вулканического хребта известно, что характер и степень их гидротермального изменения существенно отличаются как по площади, так и в геологических разрезах [Фролова и др., 2020]. Соответственно, это прямо отражается на геоэлектрических характеристиках термальных полей: значения у.э.с. могут существенно меняться в пределах одного горизонта. Но, в целом, выделяются крупные горизонты (мощностью до 70-100 м) пониженных значений у.э.с., отвечающие гидротермально измененным породам, как правило, высокопористым, разуплотненным, слабо магнитным.

Гравиметрические исследования выполнены на площади ЮКЦ, построены графики аномального гравитационного поля Δg в редукции Буге по двум профилям. Для интерпретации полученных данных выполнено двумерное сеточное моделирование в программном обеспечении GravMagInv («ЛОЛГЕО», Россия) [Лыгин и др., 2022; Чепиги, 2022; Чепиги и др., 2022] по двум профилям АОБ и ВОГ до глубины 800 м (рис. 7). Выделена область разуплотненных пород в центральной части структуры, по-видимому, погружающаяся на глубину ≥ 300 м. Данные хорошо согласуются с магнитометрическими и позволяют уверенно говорить о наличии под термальным полем зоны высокопористых (трещиноватых ?) гидротермально измененных пород, насыщенных термальными водами. Эти данные подтверждают сделанный нами ранее вывод о поступлении в район ЮКЦ глубинных щелочных термальных вод [Рычагов и др., 2020, 2021].

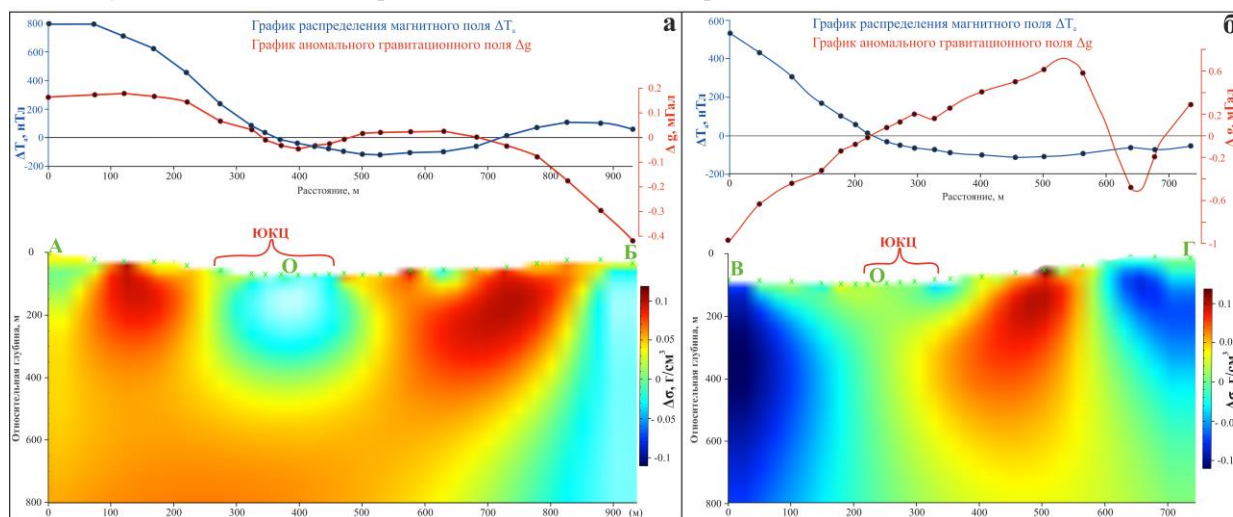


Рис. 7. Модель структуры ЮКЦ на основании гравиразведочных данных по результатам двумерного сеточного моделирования в ПО «GravMagInv»: **а)** по профилю А-О-Б; **б)** по профилю В-О-Г. Красная скобка – граница термального поля по 20°C изотерме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексных геофизических исследований получены новые 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. 8).

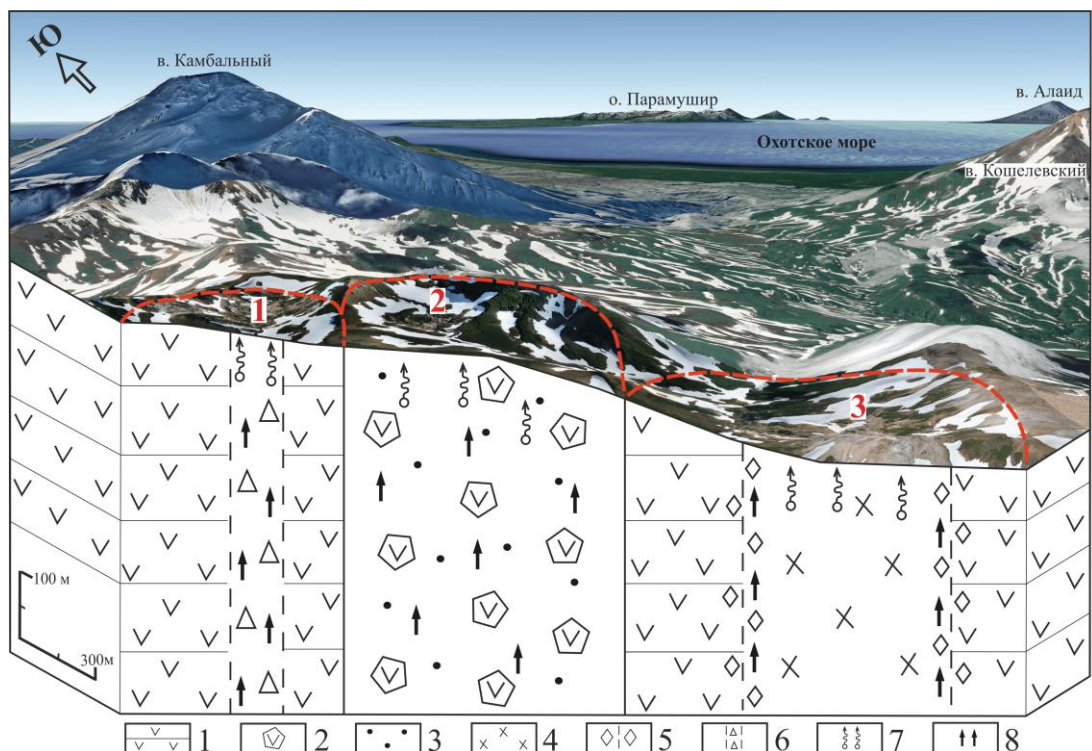


Рис. 8. Блок-диаграмма южной группы термальных полей Камбарного вулканического хребта. Принципиальные разрезы геологических структур (в плане границы структур показаны красным контуром), контролирующих основные термальные поля (1 - ЮКД, 2 - ЮКЦ, 3 - ЮКБ): 1 - андезиты и андезибазальты вулкана Термальный, 2 - крупные блоки исходных горных пород (андезитов), создающих 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.

Южно-Камбарное Дальнее термальное поле приурочено к линейному тектоническому нарушению, вдоль которого сосредоточены выходы наиболее мощных парогазовых струй и крупные кипящие водные котлы. Тектоническое нарушение также проявлено в аномальном магнитном и геоэлектрическом полях (см. рис. 4 и 5). В бортах руч. Дальний картируются интенсивно гидротермально измененные, до аргиллизитов и опалитов, андезиты палеовулкана Термальный, в то время как на удалении от ручья исходные породы подвержены, в основном, выветриванию.

Южно-Камбарное Центральное термальное поле локализовано в кольцевой морфоструктуре, вероятно, в эродированном кратере одного из моногенных вулканов, типичных для стратовулкана Термальный [Фролова и др., 2020]. Такая структурная позиция определяет изометричный характер разгрузки парогидротерм, наличие крупной обводненной зоны (геотермального резервуара ?) до глубины ≥ 300 м по данным вертикальных электрических зондирований (см. рис. 6), низкие значения магнитной восприимчивости внутри морфоструктуры (см. рис. 4). Ранее было показано, что в пределах геологической структуры, вмещающей ЮКЦ, происходит разгрузка напорных глубинных щелочных термальных вод, вследствие чего происходит карбонатизация и др. изменения вмещающих андезитов [Рычагов и др., 2021]. Все эти данные позволяют нам говорить о высокой степени неоднородности, разделения на блоки, раздробленности и, соответственно, высокой проницаемости пород в структуре ЮКЦ.

Южно-Камбарное 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 парогазовых выходов на дневной поверхности. Парогазовые струи трассируют контактные зоны и апикальную часть основной экструзии "Цветные Скалы". Корневые зоны последней, вероятно, служат источником или проводником тепла в этом термальном поле. Во

всех трех геологических структурах, обозначенных на рис. 8, наиболее интенсивные гидротермальные изменения пород (до аргиллизитов, опалитов и вторичных кварцитов) происходят в зоне приповерхностного кипения восходящих термальных вод.

На основании проведенных комплексных геолого-геофизических исследований также определена гидродинамическая связь двух термальных полей южной группы - Дальнего и Центрального. Наличие такой связи между всеми термальными полями методами «малоглубинной геофизики» не установлено. Но на основании ранее проведенных исследований с помощью сейсмической томографии [Komzeleva et al., 2021] можно предполагать единое тепловое питание для всех термальных полей не только южной группы, но и в целом для геотермальной системы Камбального хребта. Таким образом, показано, что термальные поля южной группы Камбального вулканического хребта входят в состав современной гидротермальной системы. Но требуются дополнительные геофизические, геологические, геохимические и др. исследования для понимания строения и зоны разгрузки парогидротерм, и структуры подводящих каналов глубинного газоводного флюида.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают глубокую признательность всем участникам структурно-геофизического отряда ИВиС ДВО РАН за содействие в проведении полевых исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00019.

ЛИТЕРАТУРА

- Апрелков С.Е., Ежов Б.В., Оточкин В.В., Соколов В.А.** Вулкано-тектоника Южной Камчатки // Бюллетень Вулканологических станций, 1979, № 57, с. 72-78.
- Басков Е.А., Суриков С.Н.** Гидротермы Земли. Л.: Недра, 1989.
- Белоусов В.И.** Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 175 с.
- Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г.** Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976. с. 23-57.
- Богданов Ю.А.** Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный мир, 1997. 164 с.
- Геолого-геофизический атлас** Курило-Камчатской островной системы / Под ред. Сергеева К.Ф., Красного М.Л. Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 л.
- Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А.** Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. с. 263-267. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-2-263-267](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-263-267)
- Давыдова В. О., Биндеман И. Н., Щеклеина М. Д., Рычагов С. Н.** Паужетская кальдера (Южная Камчатка): изучение временной эволюции и происхождения объемного кислого магматизма // Петрология, 2022, том 30, №5, с. 480-497 DOI: [10.31857/S0869590322050028](https://doi.org/10.31857/S0869590322050028)
- Долгоживущий центр** эндогенной активности Южной Камчатки М.: Наука, 1980. 172 с.
- Ефимов А.А., Ефимова М.В.** Синезеленые водоросли гидротерм Камчатки как сырье для получения биологически активных веществ // Фундаментальные исследования. 2007. № 10. с. 71-72.
- Иванов В.В.** Генетическая классификация минерализованных вод земной коры // Вопросы гидрогеологии минеральных вод. М.: Труды ЦНИИК и Ф., 1977. Т. 34. с. 3-58.
- Иголкина Г.В.** Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Автореф. дисс. на соискание ученой степени докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2002. 50 с.
- Кононов В.И., Поляк Б.Г.** Проблема выявления ювенильной компоненты в современных гидротермальных системах // Геохимия, 1982. № 2. с. 163-177.

Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Рычагов С.Н. Преобразование эффузивных пород под воздействием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о-в Итуруп) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. с. 20-37. DOI: [10.7868/S0203030614010039](https://doi.org/10.7868/S0203030614010039)

Левина В.И., Фирстов П.П., Зобин В.М. Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1980. № 2. с. 81-97.

Леонов В.Л. Региональные структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2001. № 5. с. 32-47.

Литасов Н.Е., Важеевская А.А. Вулкан Камбальный: научное издание // Действующие вулканы Камчатки, в 2-х томах. М.: Наука, 1991. Т. 2. с. 396-405.

Лыгин И.В., Чепиго Л.С., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Булычев А.А. Методика геоплотностного и геомагнитного интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава априорной геолого-геофизической информации // Геофизика, 2022, № 6, с. 57-70 DOI: [10.34926/geo.2022.95.89.008](https://doi.org/10.34926/geo.2022.95.89.008)

Муслимов Р.Х., Лапинская Т.А., Кавеев И.Х. Глубинные исследования докембрия востока Русской платформы. Казань: Татарское кн. изд-во, 1980. 176 с.

Непримеров Н.Н., Ходырева Э.Я., Елисеева (Христофорова) Н.Н. Геотермия областей нефтегазонакопления. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1983. 138 с.

Нехорошев А.С. Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке // Бюл. Вулканол. станции. М.: АН СССР, 1959. № 28. с. 23-32.

Нуждаев И.А., Денисов Д.К., Феофилактов С.О. Магнитометрические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. с. 163-166.

Нуждаев И.А., Рычагов С.Н., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Особенности магнитного поля геотермальных систем Паужетского района (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. с. 33-51 DOI: [10.31857/S0203030622060049](https://doi.org/10.31857/S0203030622060049)

Нуждаев И.А., Феофилактов С.О., Букатов Ю.Ю., Денисов Д.К. Геофизические исследования Южно-Камбального Центрального термального поля (Камбальный вулканический хребет, Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 2022 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. с. 146-149.

Поздеев А.И., Нажалова И.Н. Геология, гидродинамика и нефтегазоносность Кошелевского месторождения парогидротерм // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. с. 32-45.

Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988. 192 с.

Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток – геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника. 1979. № 5. с. 3-23.

Пономарева В.В. Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тефры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений // Автореферат дисс. докт. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2010. 51 с.

Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды: лечебные, промышленные, энергетические. Л.: Недра, 1977. 240 с.

Поспеева Е.В., Витте Л.В., Потапов В.В., Сахарова М.А. Магнитотеллурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности (на примере Горного Алтая) // Геофизика, 2014, № 4, с. 8—16

Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций. М.: Недра, 1977, 296 с.

Ривош Л.А. Карта аномального магнитного поля СССР. Камчатка. 1962.

Рычагов С.Н. Гигантские газо-гидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // Вулканология и сейсмология. 2014. № 2. с. 3-28. DOI: [10.7868/S0203030614020060](https://doi.org/10.7868/S0203030614020060)

Рычагов С.Н. Рудообразующие гидротермально-магматические системы Курило-Камчатской островной дуги и их аналоги // Пленарное совещание по проекту МПГК-408: Заполярный - Петропавловск-Камчатский, 2002. 45 с.

Рычагов С.Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг // Автореферат дисс. докт. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 50 с.

Рычагов С.Н., Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю. и др. Геолого-геофизическая модель крупнейшего на Камчатке Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения // Доклады АН. Том 482. №2. 2018. с. 183-187. DOI: [10.31857/S086956520003188-9](https://doi.org/10.31857/S086956520003188-9)

Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Нуждаев А.А. и др. Южно-Камбальное термальное поле: структурное положение, гидрогеохимические и литологические характеристики // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. с. 198-201.

Рычагов С.Н., Сандмирова Е.И., Чернов М.С. и др. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. с. 45-60. DOI: [10.31857/S0203030621040052](https://doi.org/10.31857/S0203030621040052)

Сахаров В.А., Ильин В.В., Морозова О.А. и др. Дагинское месторождение термальных минеральных вод. Условия формирования, современное состояние, перспективы использования (Сахалинская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. 2020. Т. 331. № 1. с. 13-26. DOI: [10.18799/24131830/2020/1/2443](https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2443)

Сережников А.И., Селецкий Ю.Б., Поляков В.А. и др. Дейтерий, кислород-18 и тритий в термальных водах Южной Камчатки (распространенность и участие в процессах формирования вод) // Геохимия. 1982. № 2. с. 178-191.

Стратегия развития топливно-энергетического потенциала Дальневосточного экономического региона до 2020 г. Владивосток: Дальнаука, 2001. 112 с.

Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.

Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона // Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона. М.: Наука, 1982. с. 93-107.

Сугробов В.М., Кононов В.И., Постников А.И. Прогнозные геотермальные ресурсы областей современного вулканизма Камчатки и Курильских островов: научные и прикладные аспекты // Материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара. Петропавловск-Камчатский, 2005. с. 9-24

Сурмаажав Д. Теплоэнергетические ресурсы термальных вод Центральной Монголии // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. с. 106-112. DOI: [10.17513/use.37479](https://doi.org/10.17513/use.37479)

Сывороткин В.Л. Современный вулканизм Южной Камчатки и гидротермальный процесс // Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов и И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. с. 19-38.

Феофилактов С. О., Рычагов С. Н., Логинов В. А. и др. Глубинное строение района Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. с. 40–56. DOI: [10.31857/S020303062101003X](https://doi.org/10.31857/S020303062101003X)

Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю. и др. Новые данные о строении зоны разгрузки гидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. с. 36–50. DOI: [10.7868/S0203030617050030](https://doi.org/10.7868/S0203030617050030)

Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю. и др. Строение зоны разгрузки парогидротерм в районе Верхне-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Геология и геофизика. 2020. т. 61, № 9, с. 1194-1214. DOI: [10.15372/GiG2019163](https://doi.org/10.15372/GiG2019163)

Феофилактов С.О., Нуждаев И.А., Денисов Д.К. Строение зоны разгрузки парогидротерм Южно-Камбального Центрального термального поля по геофизическим данным (Южная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII Всероссийской научной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. с. 227-230.

Фирстов П.П., Лобачева М.А. Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Камбальный (Камчатка) в 2017 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 2. Выпуск 38. с. 45-58. DOI: [10.31431/1816-5524-2018-2-38-45-58](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-45-58)

Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. и др. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. с. 36-51. DOI: [10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51](https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51)

Фролова Ю.В., Суровцева К.И., Чернов М.С., Рычагов С.Н. Изменения андезитов в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбального Дальнего термального поля (Камчатка) // Материалы XXI региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. с. 218-221.

Христофорова Н.Н., Христофоров А.В., Муслимов Р.Х. Разуплотненные зоны в кристаллическом фундаменте // Георесурсы, 1999. № 1 (1). с. 4-15.

Чепиго Л.С., Лыгин И.В., Булычев А.А. Решение обратной задачи гравиразведки с переменной скоростью градиентного спуска // Геофизические исследования, 2022, том 23, № 1, с. 5-19 DOI: [10.21455/gr2022.1-1](https://doi.org/10.21455/gr2022.1-1)

Чепиго Л.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610137 GravMagInv, 10 января 2022 (<https://fips.ru/EGD/3802bc21-d68a-427b-b34d-66c0d1054271>)

Alcala F.J., Custodio E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal // Journal of Hydrology. 2008. № 359. p. 189-207. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.06.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.028)

Bellani S., Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D., Ranalli G. Heat flow, deep temperatures and extensional structures in the Larderello Geothermal Field (Italy): constraints on geothermal fluid flow // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2004. V. 132. p. 15-29.

Benz H.M., Zandt G., Oppenheimer D.H. Lithospheric structure of northern California determined from teleseismic images of the upper mantle // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97. p. 4791-4807.

Bertani R., Bertini G., Cappetti G., Fiordelisi A., Marocco B.M. An Update of the Larderello-Travale/Radiocondoli Deep Geothermal System // Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005. 7 p.

Gianelli G., Manzella A., Puxeddu M. Crustal models of the geothermal areas of southern Tuscany (Italy) // Tectonophysics. 1997. V. 281. p. 221-239.

Komzeleva V., Koulakov I., Rychagov S.N. et al. Sources of the eruption of Kambalny volcano (Southern Kamchatka) in March 2017 inferred from local earthquake tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2021. V. 420. 107392. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2021.107392](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107392)

Kralj P., Kralj P. Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia // Environmental Geology. 2000. V. 19. № 5. p. 0488-0500.

Lachenbruch A.H., Sass J.H. Heat flow and energetics of the San Andreas fault zone // Journal of Geophysical Research. 1980. V. 85. p. 6185-6222.

Shigeno H. Evolution history of the Kakkonda magma-hydrothermal system, Japan, estimated through simplified-model numerical simulations // Proc. 25th Workshop on geothermal reservoir engineering 2000. USA: Standford University, 2000. p. 135-142.

Soengkono S., Hochstein M.P., Interpretation of magnetic anomalies over the Reporoa geothermal field, Taupo volcanic zone, New Zealand // Proceedings 18th NZ Geothermal Workshop 1996. p. 243-248.

Stimac J.A., Goff F., Wohletz K. Thermal modeling of the Clear Lake magmatic-hydrothermal system, California, USA // Geothermics. 2001. V. 30. p. 349-390.

Uchida T., Akaku K., Sasaki M., Kamenosono H., Doi N., Miyazaki S. Recent progress of NEDOs “Deep-seated geothermal resources survey” project // Geothermal Resources Council Transactions, 1996. V. 20. p. 643-648.

Verdoya M., Pasquale V., Chiozzi P. Thermo-mecanical evolution and rheology of the northern sector of the Tyrrhenian – Apennines system // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2005. V. 148. p. 20-30.

World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik: Harpa, 24-27 October, 2021.
<https://www.wgc2020.com>.