

УДК 553.078.2

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЮЖНОЙ ГРУППЫ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ
КАМБАЛЬНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА (Камчатка)
И.А. Нуждаев, С.Н. Рычагов, С.О. Феофилактов, Ю.Ю. Букатов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийта, 9, Россия

На основании комплексных структурно-геофизических исследований и обобщения геофизических, гидрогеологических, минералого-геохимических и других 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.

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

STRUCTURE OF THE HYDROTHERMAL SYSTEM OF THERMAL FIELDS INFERRED
FROM GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL MODELING:
A CASE STUDY OF THE KAMBALNY VOLCANIC RIDGE (Kamchatka)

I.A. Nuzhdaev, S.N. Rychagov, S.O. Feofilaktov, Yu.Yu. Bukatov

Based on integrated structural and geophysical studies and generalization of geophysical, hydrogeological, mineralogical, geochemical and other data, it is shown that the southern cluster of thermal fields of the Kambalny volcanic ridge (South Kamchatka) is included in the modern hydrothermal system. New data on the structure of the steam hydrotherm discharge area investigated to a depth of about 300 m have been obtained. The structural and hydrodynamic connection between two thermal fields from this group has been established. The Kambalny ridge geothermal system embracing all major clusters of thermal fields is assumed to have a single deep-seated source of heat supply.

Modern hydrothermal system, thermal fields, geophysical methods, structure, zone of discharge of steam hydrotherms, deep-seated source of heat supply

ВВЕДЕНИЕ

Современные гидротермальные системы, несмотря на длительную историю изучения, остаются объектами пристального внимания ученых всего мира из различных областей знаний [Иванов, 1977; Посохов, Толстыхин, 1977; Басков, Суриков, 1989; Kralj, Kralj, 2000; Ефимов, Ефимова, 2007; Alcala, Custodio, 2008; Сахаров и др., 2020; Сурмаажав, 2020; World..., 2021]. В геологии неослабевающий интерес к ним обусловлен, прежде всего, огромной ролью потоков восходящих газоводных флюидов в становлении и преобразовании земной коры океанов, зон субдукции, вулканических островных дуг и даже древних платформ [Муслимов и др., 1980; Lachenbruch, Sass, 1980; Кононов, Поляк, 1982; Benz et al., 1992; Богданов, 1997; Gianelli et al., 1997; Христофорова и др., 1999; Иголкина, 2002; Рычагов, 2002, 2003; Bellani et al., 2004; Bertani et al., 2005]. Большое значение в конвективном переносе тепла и вещества играют сквозькоровые гигантские газогидротермальные системы [Поляк и др., 1979; Uchida et al., 1996; Shigeno, 2000; Stimac et al., 2001; Verdoya et al., 2005; Поздеев, Нажалова, 2008; Рычагов, 2014; Рычагов и др., 2018]. В областях современного и четвертичного вулканизма такие системы локализуются в геотермальных районах, приуроченных к центральным частям долгоживущих вулканогенно-рудных центров [Прогнозная оценка..., 1977; Долгоживущий центр..., 1980; Леонов, 2001]. Одним из таких центров является Паужетский (Паужетско-Камбально-Кошелевский), расположенный на южной оконечности Камчатки [Белоусов, 1978; Сугробов, 1982; Рычагов, 2003].

Южная Камчатка представляет собой один из наиболее перспективных регионов для изучения сквозькоровых гигантских газогидротермальных систем в связи с ее особым геодинамическим положением (приуроченностью к зоне сочленения трех вулканических поясов и стыку региональных тектони-

ческих 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—1980-е 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 нерешенными 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 других видах деятельности человека [World..., 2021].

Камбальский вулканический хребет считается одной из крупнейших геотермальных систем Камчатки, по выносу тепла она сопоставима с Долиной гейзеров, Кошевским и Семячинским вулканическими массивами, Мутновской и другими 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 [Некорощев, 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., 2020а; 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 газогидротермальных процессов в активизации влк. 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, и, по-видимому, 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.

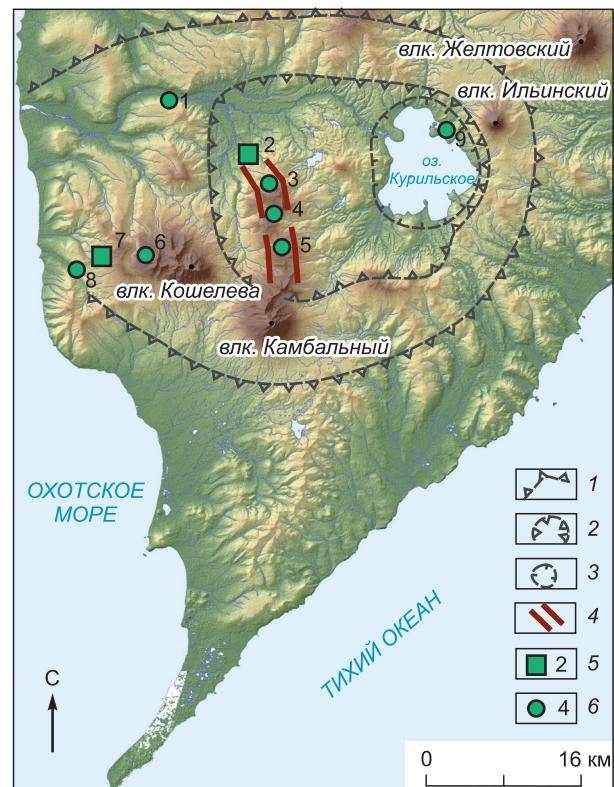
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Паужетско-Камбально-Кошевский геотермальный район приурочен к длительно живущему вулканогенно-рудному центру южной оконечности Камчатки [Прогнозная оценка..., 1977]. Основные геотермальные аномалии и месторождения района локализуются в крупной ($\sim 35 \times 50$ км) овально-кольцевой вулканотектонической структуре типа аккумулятивно-сводового поднятия [Долгоживущий центр..., 1980] (рис. 1). Время заложения структуры относится к раннему миоцену. В центральной части поднятия вследствие длительной интенсивной тектономагматической деятельности (от миоцена по голоцен) образовалась вулканотектоническая депрессия [Белоусов, 1978; Долгоживущий центр..., 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].

Камбальный вулканический хребет представляет собой резургентное тектономагматическое 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 центр..., 1980]. Возраст вулканов близкий — от нижне- до среднеплейстоценового. Крупные постройки осложнены паразитическими конусами кислого, среднего и основного составов, а также экструзиями дацитов и андезитов и воронками взрывов. Предполагается эволюция единого глу-

Рис. 1. Основные структуры Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района Южной Камчатки:

1 — Паужетская вулканотектоническая структура типа аккумулятивно-сводового поднятия, по [Долгоживущий центр..., 1980]; 2 — Паужетская вулканотектоническая 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, 9 — Теплая бухта).



бинного магматического очага или серии периферических очагов с юга на север структуры [Долгоживущий центр..., 1980]. Но в раннем голоцене образовался базальтовый современный действующий влк. Камбальный («шлаковый конус», по [Сывороткин, 1993]), по-видимому, не имеющий прямого отношения к эволюции одноименного хребта. На это, помимо возраста, указывает положение вулкана в Паужетской вулканотектонической 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., 2021]. Мы полагаем, что образование Камбального вулкана обусловлено активизацией в раннем голоцене тектономагматических 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 хр. 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 100.0 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 связаны 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, неслучайно вызывает повышенный интерес гидрогеологов, геологов, петрологов, минералогов и геохимиков. Она приурочена к влк. 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 другими металлами [Структура ..., 1993; Рычагов и др., 2020]; 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).

Южно-Камбальное Дальнее термальное поле (ЮКД) расположено в U-образной долине руч. 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 ру-

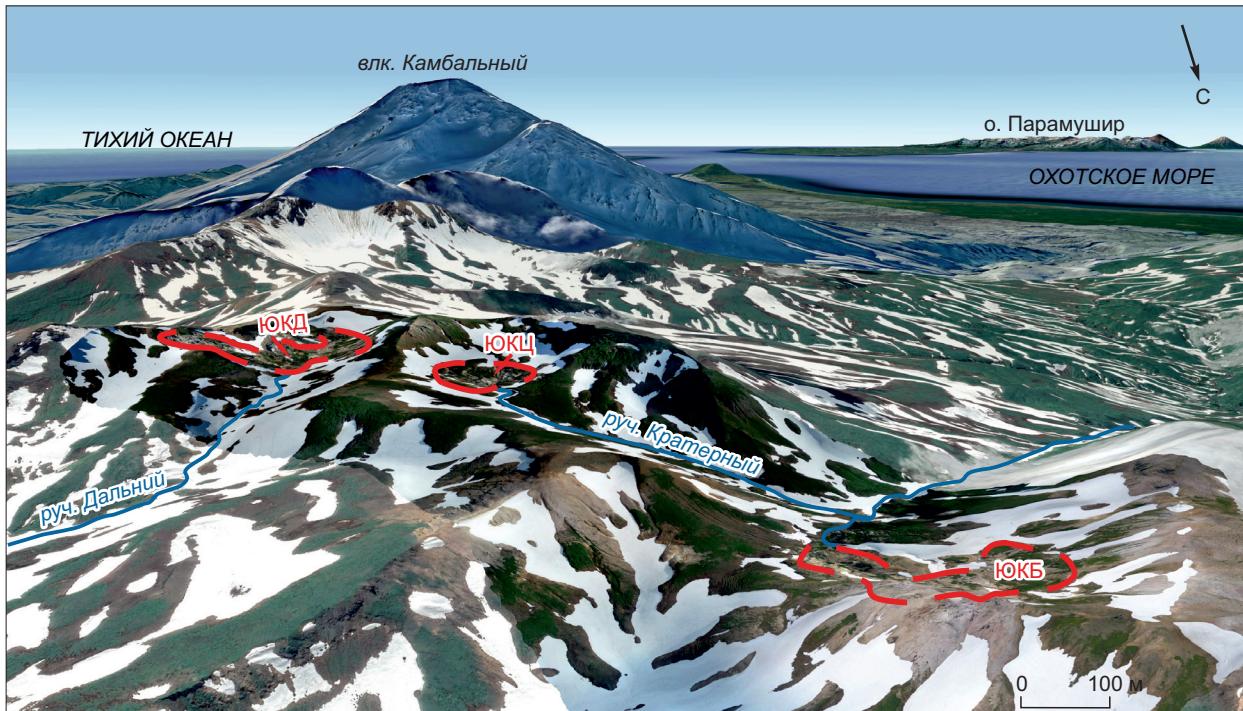


Рис. 2. Схема расположения термальных полей южной группы Камбарального вулканического хребта.

Красной штриховой линией показаны границы термальных полей по 20 °С изотерме: ЮКБ — Южно-Камбаральное Ближнее, ЮКЦ — Южно-Камбаральное Центральное, ЮКД — Южно-Камбаральное Дальнее.

чья. Термопроявления представлены парящими грунтами (температура на глубине 0.8 м достигает 107 °С), парогазовыми струями (средние температуры 94—98 °С, максимальные 120 °С), грязеводными и водными источниками (температура не превышает 98 °С), 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-Камбаральное Центральное поле (ЮКЦ) локализовано в кольцевой морфоструктуре диаметром ~1000—1200 м, представляющей собой, по-видимому, эродированный кратер одного из конусов влк. 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-Камбаральное Ближнее термальное поле (ЮКБ) расположено в 2.5 км к северу от ЮКЦ и приурочено к глубоковрезанной 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 °С) грунтами и мелкими парогазовыми струями (температуры не выше 98 °С). Среди водных источников преобладают грязеводные котлы с кислыми растворами, но ряд газоводных источников с чистой водой имеют pH до 7.5—8.5. 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 п-ова Камчатка, установления связей между вулканизмом и тектоникой. Исследуемый нами район, в том числе Камбальный хребет, покрыт аэромагнитной съемкой м-ба 1:1 000 000 [Ривош, 1962]. На карте аномального магнитного поля на фоне положительной аномалии, вытянутой в меридиональном направлении на протяжении всего хр. Камбальный, выделяется почти изометричный максимум магнитного поля, смещенный к югу от вершины влк. Камбальный. В гравитационном поле в районе Камбального хребта выделена локальная отрицательная аномалия, образование которой связывается в общем с формированием Паужетской вулканотектонической депрессии [Литасов, Важеевская, 1991].

Неожиданное эксплозивное извержение влк. 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 ИНГГ 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., 2020б]. 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., 2018, 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 ($\chi = 28.8 \cdot 10^{-3} \text{ ед. СИ}$), что обусловлено присутствием в их составе титаномагнетита и пироксенов. Сильноизмененным андезибазальтам свойствен желтовато-бежевый цвет, что характерно для кислотного выщелачивания — разрушения темноцветных минералов с выносом железа, алюминия и других 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 ($\chi = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ ед. СИ}$). 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 км², с выходом за 20 °С изотерму на всех термальных разгрузках южной группы. Всего выполнено 14 500 рядовых замеров, среднеквадратическая погрешность съемки составила $\pm 6 \text{ нТл}$.

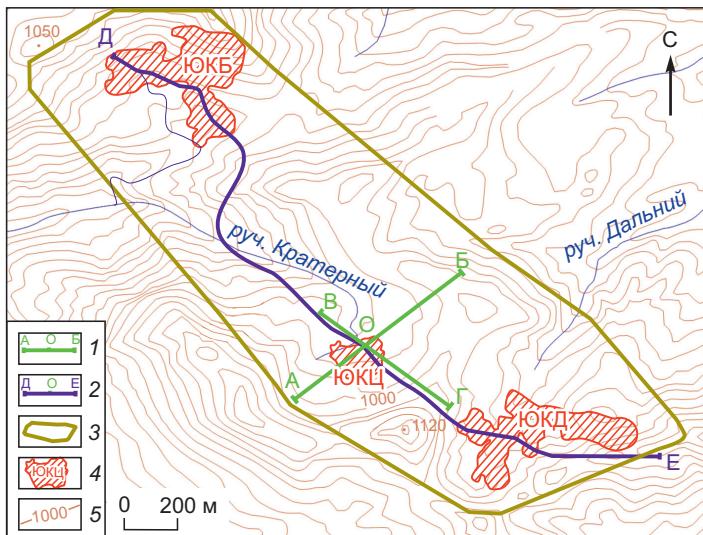


Рис. 3. Схема расположения геофизических исследований, профили и пункты зондирований.

1 — профиль ВЭЗ и гравиразведочных исследований для площади ЮКЦ; 2 — профиль ВЭЗ через южную группу Камбальских термальных полей; 3 — граница площадной магнитной съемки и каппаметрии; 4 — площадь термальных полей по 20 °C изотерме, 5 — изолинии рельефа (м).

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 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 южную 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 $\leq 5\%$.

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 наблюденные 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-Камбальской группы термальных полей (рис. 4, а). Среднее значение наблюденного магнитного поля 50 300 нТл. Диапазон изменения ΔT_a от -1000 до 1300 нТл. В целом термальные поля характеризуются пониженным модулем магнитной индукции T 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 типичной является прямая связь температурного поля с отрицательными аномалиями ΔT_a вследствие аргиллизации пород и разрушения ферромагнитных минералов [Феофилактов и др., 2017, 2020б]. 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.

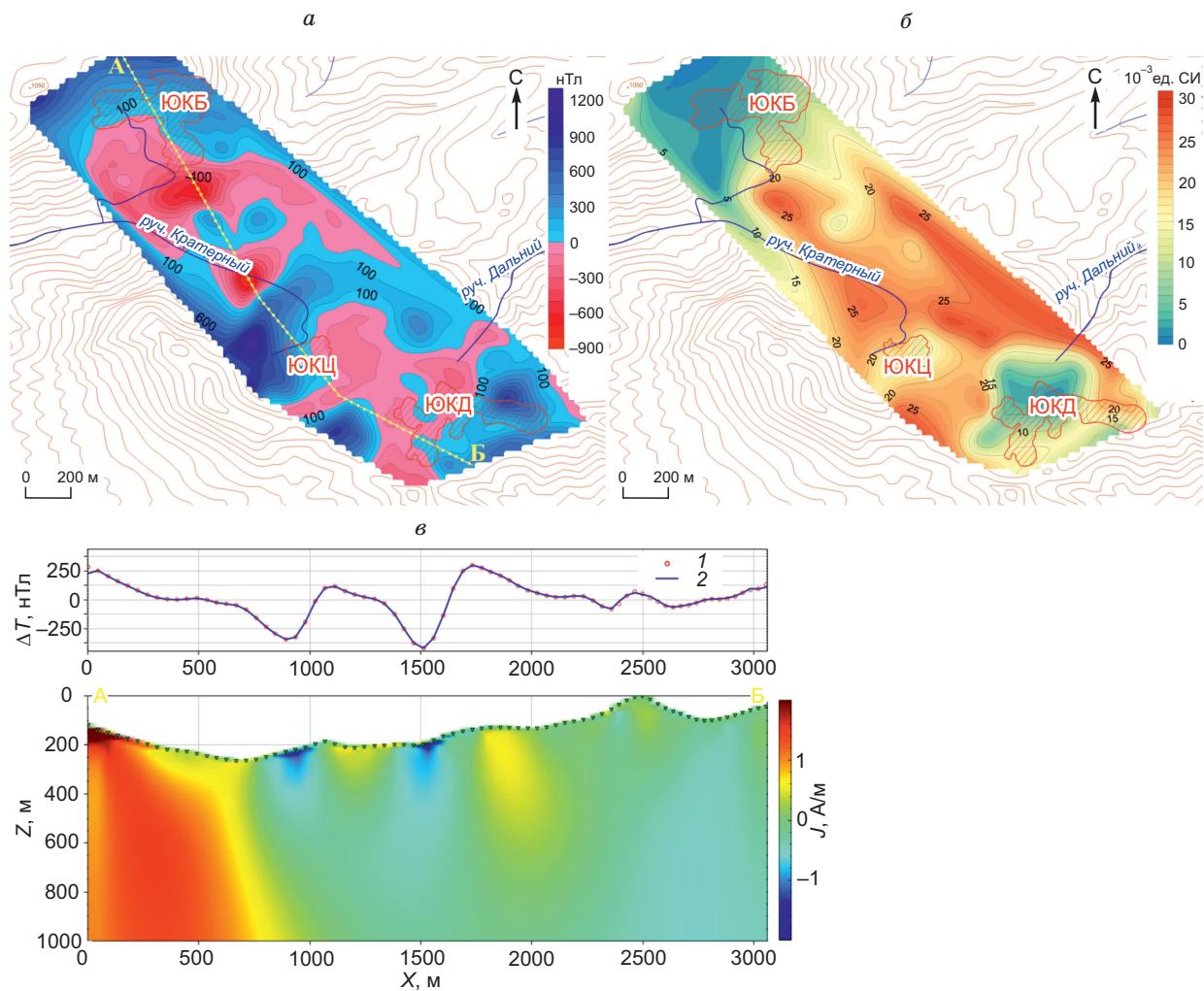


Рис. 4. Карта аномалий магнитного поля ΔT_a для группы Южно-Камбальских термальных полей (а); карта распределения значений магнитной восприимчивости для группы Южно-Камбальских термальных полей (б); разрез по профилю А—Б, построенный по результатам двумерного сеточного моделирования (в).

1 — ΔT наблюдено, 2 — ΔT рассчитанное.

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 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 изометрические аномалии, вытянутые в северо-западном направлении и пространственно связанные с термальными полями южной группы. Таким образом, эти отрицательные магнитные аномалии являются локальными на исследуемом участке и, по-видимому, образовались в результате аргиллизации пород под действием гидротермального флюида.

На карте распределения магнитной восприимчивости (см. 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 ($\text{pH} < 5$), 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 (см. рис. 4, в). Повышенные значения намагниченности относятся к экструзивному комплексу Цветные Скалы, подтверждается региональный характер аномалии в этой области. ЮКБ свойственны значения намагниченности от 0 до 1 А/м, что объясняется приуроченностью термального поля к наиболее прогретым апикальным частям экструзии. Такие же значения типичны 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. На рисунке 5, г представлены типичные наблюденные кривые ВЭЗ для Южно-Камбальских термальных полей 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 характеризуются 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 зондирований на термальных полях отличаются низкими значениями ρ_k в верхней части разреза (первые единицы и десятки Ом·м). В интервале разносов $AB/2 =$

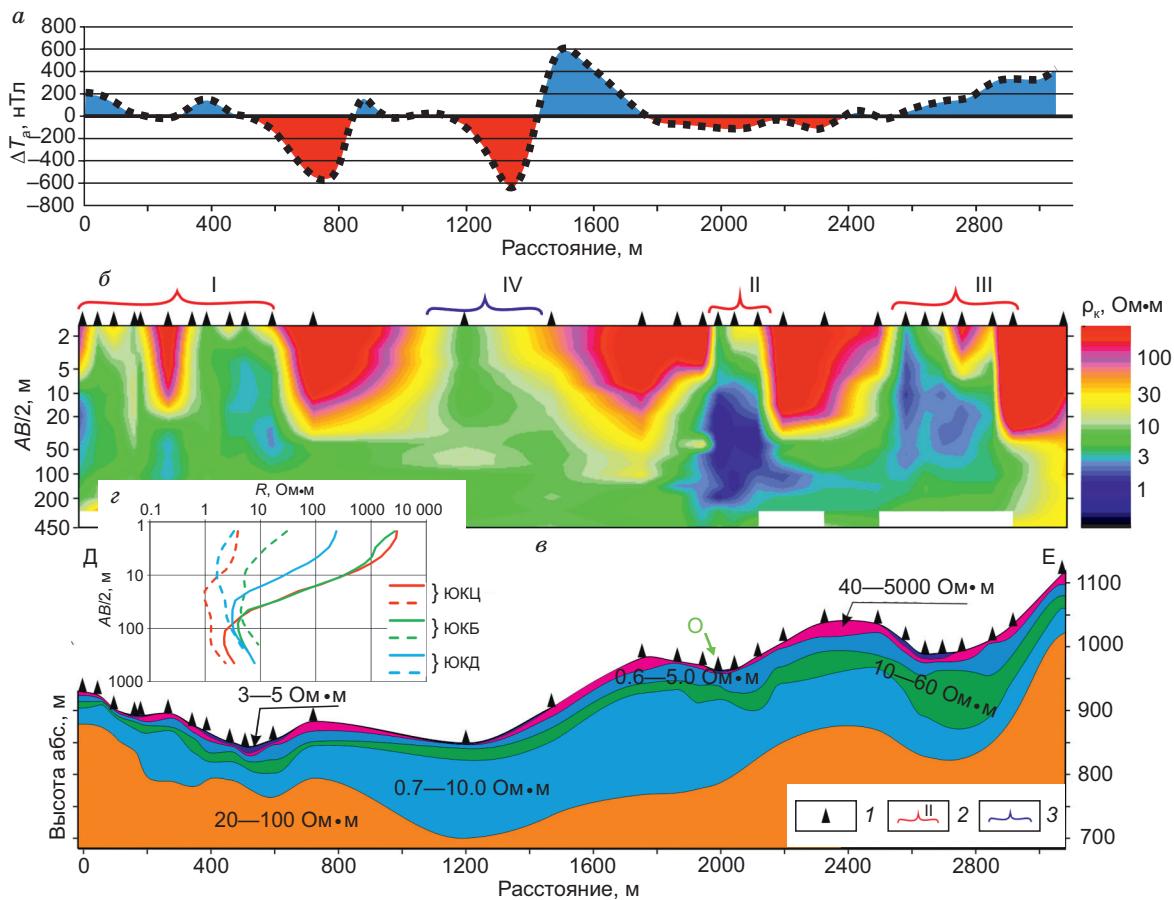


Рис. 5. График распределения значений ΔT_a по профилю Д—О—Е (а), согласованный с разрезами кажущегося сопротивления (б) и геоэлектрическим (в), полученными по результатам ВЭЗ, г — представлены типичные наблюденные кривые ВЭЗ для южной группы термальных полей Камбальных (штриховые линии) и для исследуемого района за пределами 20 °С изотермы (прямые линии).

1 — точки ВЭЗ; 2 — участки термальных полей по изотерме 20 °С, I — ЮКБ, II — ЮКЦ, III — ЮКД; 3 — долина руч. Кратерный с обозначением его русла IV.

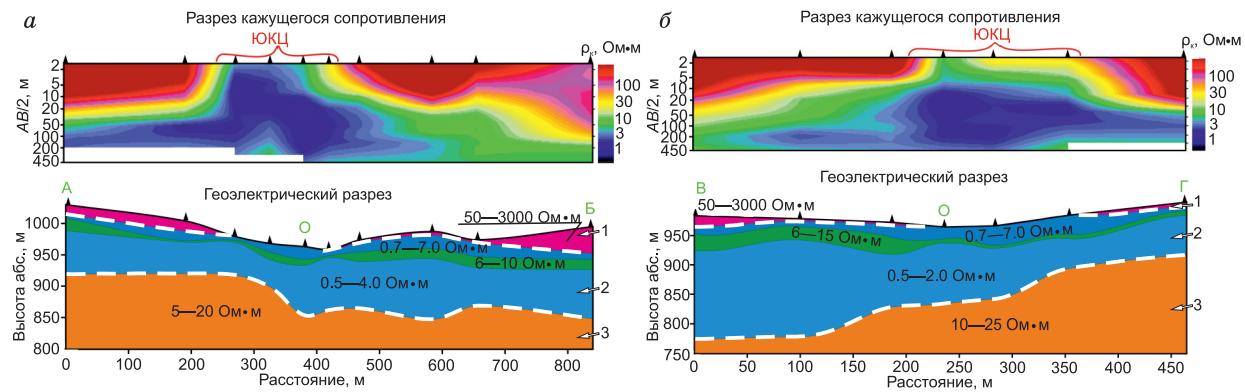


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по данным ВЭЗ:

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 УЭС для каждого горизонта.

= 20—80 м наблюдается перегиб кривых, указывающих на наличие промежуточного горизонта пород с повышенным значением сопротивлений, мощность и глубина которого варьирует по разрезу.

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 свойственны более высокие значения удельного электрического сопротивления (УЭС) — до 5 Ом·м. На этих термальных полях выделяется один общий горизонт пород с низкими значениями удельного электрического сопротивления (0.6—10.0 Ом·м). Горизонт имеет максимальную мощность до 200 м в русле руч. Кратерный (IV) и осложнен промежуточным слоем с повышенными значениями УЭС (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 чащебразные 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) типичны слабоположительные 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. Кратерный. По-видимому, здесь проходит структурная граница между гидротермально-метасоматическими породами и неизмененными или слабоизмененными андезитами. Для ЮКЦ характерны слабоотрицательные 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 3.0 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 Камбальского 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:

1. Приповерхностный горизонт пород с высокими значениями УЭС 50—3000 Ом·м мощностью от нуля в районе разгрузки термальных вод до 15—40 м за ее пределами. К породам этого горизонта относятся неизмененные и слабоизмененные андезиты.

2. Горизонт пород с сопротивлением 0.7—7.0 Ом·м, мощностью от 70 м в краевых частях профиля до 140 м в его центральной части. Он разделен горизонтом пород с повышенными значениями УЭС (6—15 Ом·м) мощностью 3—20 м. Геоэлектрический горизонт включает в себя гидротермально изменившиеся разности пород.

3. Горизонт основания разреза со значениями УЭС 5—25 Ом·м. Он соответствует, по-видимому, относительно слабовлагонасыщенным породам.

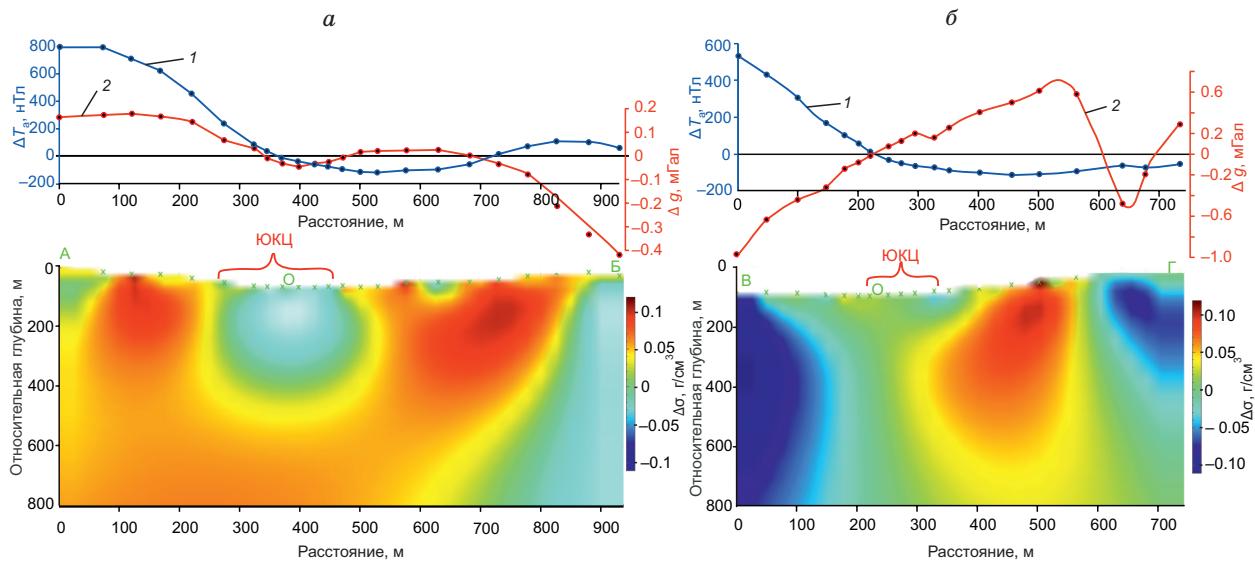


Рис. 7. Модель структуры ЮКЦ на основании гравиразведочных данных по результатам двумерного сеточного моделирования в ПО «GravMagInv»:

а — по профилю А—О—Б; *б* — по профилю В—О—Г. Красная скобка — граница термального поля по 20 °С изотерме. 1 — график распределения магнитного поля ΔT_a , 2 — график аномального гравитационного поля Δg .

Для пород южной группы термальных полей Камбальского 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 УЭС могут существенно меняться в пределах одного горизонта. Но в целом выделяются крупные горизонты (мощностью до 70—100 м) пониженных значений УЭС, 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 («ЛОЛ-ГЕО», Россия) [Лыгин и др., 2022; Чепиго, 2022; Чепиго и др., 2022] по двум профилям А—О—Б и В—О—Г 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].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексных геофизических исследований получены новые данные о строении термальных полей южной группы Камбальского вулканического хребта. Показано, что термальные поля локализуются в геологических структурах, характеризующихся высокой степенью пористости и трещиноватости гидротермально измененных пород (рис. 8).

Южно-Камбальное 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, 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-Камбальное Центральное термальное поле локализовано в кольцевой морфоструктуре, вероятно, в эродированном кратере одного из конусов, 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

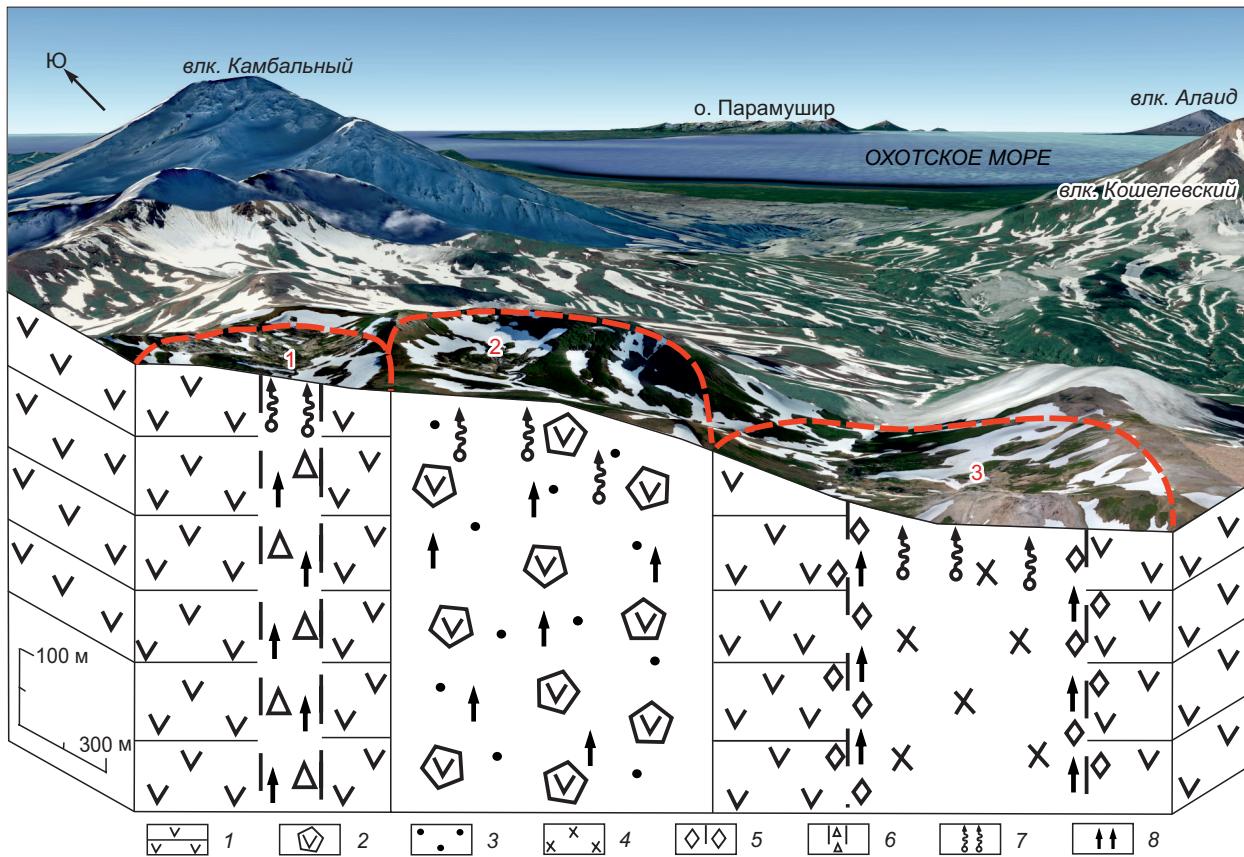


Рис. 8. Блок-диаграмма южной группы термальных полей Камбарального вулканического хребта.

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 влк. 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 экзоконтактовые зоны экструзий; 6 — субвертикальные тектонические нарушения; 7 — приповерхностное кипение; 8 — глубинный флюид.

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 другие изменения вмещающих андезитов [Рычагов и др., 2021]. Все эти данные позволяют нам говорить о высокой степени неоднородности, разделении на блоки, раздробленности и, соответственно, высокой проницаемости пород в структуре ЮКЦ.

Южно-Камбаральное Ближнее термальное поле расположено в полуцирке и приурочено к экструзивному комплексу дакитового состава Цветные Скалы. Комплекс состоит из нескольких экструзий (предположительно отдельных блоков единого экструзивно-субвулканического тела), прорывающих лавы андезитового состава влк. 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 (см. 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 Камбарального 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 другие исследования для понимания строения и зоны разгрузки парогидротерм и структуры подводящих каналов глубинного газоводного флюида.

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., Соколков В.А.** Вулканотектоника Южной Камчатки // Бюл. вулканологических станций, 1979, № 57, с. 72—78.
- Басков Е.А., Суриков С.Н.** Гидротермы Земли. Л., Недра, 1989, 243 с.
- Белоусов В.И.** Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М., Наука, 1978, 175 с.
- Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г.** Геологическое строение и гидрологические 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.
- Гидротермальные** системы и термальные поля Камчатки / Ред. В.М. Сугробов. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 23—57.
- Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев 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.
- 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, т. 30, № 5, с. 480—497, doi: 10.31857/S0869590322050028.
- Долгоживущий центр** эндогенной активности Южной Камчатки / Ред. Ю.П. Мансуренков. 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 гидрографии минеральных вод. М., 1977, т. 34. с. 3—58.
- Иголкина Г.В.** Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин: Автореф. дис. ...д. г.-м. н., 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 эфузивных пород под воздействием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о. Итуруп) // Вулканология и сейсмология, 2014, № 1, с. 20—37, doi: 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 // Действующие вулканы Камчатки. В 2 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.
- Муслимов Р.Х., Лапинская Т.А., Кавеев И.Х.** Глубинные исследования докембрия востока Русской платформы. Казань, Тат. кн. изд-во, 1980, 176 с.
- Нехорошев А.С.** Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке // Бюл. вулканологической станции, 1959, № 28, с. 23—32.
- Нуждаев И.А., Денисов Д.К., Феофилактов С.О.** Магнитометрические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) // Вулканализм и связанные с ним про-

цессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 2019 г. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2019, с. 163—166.

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, посвященной Дню вулканолога, 2022 г. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2022, с. 146—149.

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.

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

Поляк Б.Г., Толстыхин 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 рельфа и отложений: Автореф. дис.... д. г. н. М., Институт географии РАН, 2010, 51 с.

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

Прогнозная оценка рудоносности вулканогенных формаций / Под ред. М.М. Василевского, Ю.М. Стефанова, Б.И. Широкого. М., Недра, 1977, 296 с.

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

Рычагов С.Н. Гигантские газогидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // Вулканология и сейсмология, 2014, № 2, с. 3—28, doi: 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, ИВиС ДВО РАН, 2002, 45 с.

Рычагов С.Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг: Автореф. дис.... д. г.-м. н. М., ИГЕМ РАН, 2003, 50 с.

Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нуждаев И.А. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2017, № 4, вып. 36, с. 13—27.

Рычагов С.Н., Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Феофилактов С.О. Геологогеофизическая модель крупнейшего на Камчатке Нижне-Кошевского пародоминирующего геотермального месторождения // ДАН, 2018, т. 482, № 2, с. 183—187. doi: 10.31857/S086956520003188-9.

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

Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С., Кравченко О.В., Карташева Е.В. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2021, № 4, с. 45—60, doi: 10.31857/S0203030621040052.

Сахаров В.А., Ильин В.В., Морозова О.А., Выпряжкин Е.Н., Гоголева И.В. Дагинское месторождение термальных минеральных вод. Условия формирования, современное состояние, перспективы использования (Сахалинская область) // Изв. Том. политех. ун-та, 2020, т. 331, № 1, с. 13—26, doi: 10.18799/24131830/2020/1/2443.

Сережников А.И., Селецкий Ю.Б., Поляков В.А., Исаев Н.В., Пятницкий Н.В., Якубовский А.В., Романов В.В. 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. / Ред. А.П. Сорокин. 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, Изд-во «Оттиск», 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.

Сывороткин В.Л. Современный вулканизм Южной Камчатки и гидротермальный процесс // Структура гидротермальной системы / Под ред. В.И. Белоусова, И.С. Ломоносова. М., Наука, 1993, с. 19—38.

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, doi: 10.7868/S0203030617050030.

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, 2020а, т. 61 (9), с. 1194—1214, doi: 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, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2020б, с. 227—230.

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, doi: 10.31857/S020303062101003X.

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, вып. 38, с. 45—58, doi: 10.31431/1816-5524-2018-2-38-45-58.

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», посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2018, с. 218—221.

Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С., Суровцева К.И., Кузнецов Р.А., Большаков И.Е. 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.

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, т. 23, № 1, с. 5—19, doi: 10.21455/gr2022.1-1.

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

Alcalá F.J., Custodio E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal // J. Hydrol., 2008, v. 359, p. 189—207, doi: 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 // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2004, v. 132, p. 15—29.

Benz H.M., Zandt G., Oppenheimer D.H. Lithospheric structure of northern California from teleseismic images of the upper mantle // J. Geophys. Res., 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 // Proc. World Geothermal Congr. 2005. Antalya, Turkey, 2005, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/0936.pdf>.

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., Gordeev E.I., Abkadyrov I., Stupina T., Novgorodova A. Sources of the eruption of Kambalny volcano (Southern Kamchatka) in March 2017 inferred from local earthquake tomography // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2021, v. 420, 107392, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107392.

Kralj P., Kralj P. Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia // Environ. Geol., 2000, v. 19 (5), p. 488—500.

Lachenbruch A.H., Sass J.H. Heat flow and energetics of the San Andreas Fault Zone // J. Geophys. Res., 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. Stanford, CA, Stanford Univ., 2000, p. 135—142.

Soengkono S., Hochstein M.P. Interpretation of magnetic anomalies over the Reporoa geothermal field, Taupo volcanic zone, New Zealand // Proc. 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 Trans., 1996, v. 20, p. 643—648.

Verdoya M., Pasquale V., Chiozzi P. Thermo-mechanical evolution and rheology of the northern sector of the Tyrrhenian–Apennines system // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2005, v. 148, p. 20—30.

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