

СТРУКТУРА И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ЮЖНОЙ ГРУППЫ КАМБАЛЬНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ХРЕБТА (КАМЧАТКА) ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ СЪЕМКАМ ГРУНТОВ

© 2024 С.О. Феофилактов, С.Н. Рычагов, И.А. Нуждаев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: serg415@kscnet.ru; rychn@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 19.09.2023; после доработки 22.01.2024; принята в печать 25.03.2024

Проведена температурная съемка грунтов на трех термальных полях южной группы Камбального вулканического хребта (Южно-Камбальное Ближнее, Центральное и Дальнее термальные поля). Дана характеристика их современного состояния. Формирование температурных аномалий определяется особенностями геологического строения каждого термального поля. Сопоставляются полученные карты температурных съемок 2021 и 1965 гг. Показаны изменения условий разгрузки конвективного теплового потока в геологической структуре термальных полей. С течением времени существенно увеличились размеры температурных полей на всех геологических структурах южной группы Камбального вулканического хребта. Увеличилась площадь наиболее прогретых участков термоаномалий. Максимальные температуры грунтов возросли в среднем на 10 °С. Отдельные термопроявления (кипящие и пульсирующие водные котлы, парогазовые струи) увеличили свои расходы и (или) температуру. Обнаружены новые прогретые участки в пределах термоаномалий.

Ключевые слова: вулканический хребет, термальное поле, температурная съемка, тепловой поток.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач при изучении гидротермальных систем областей современного вулканизма является измерение температуры растворов, газов, пород и грунтов в зоне разгрузки парогидротерм. Традиционно такие работы проводятся для оценки тепловой мощности термоаномалий, газогеохимического и гидрогеохимического картирования территорий, изучения водного питания гидротермальных систем, прогноза физико-химических параметров источников тепла, определения границ распространения интенсивно измененных аргиллизированных пород, уточнения природы геофизических аномалий, и др. (Басков, Суриков, 1975; Белоусов и др., 1976; Вакин и др., 1976; Калачева и др., 2016; Сугробов, 1979; Феофилактов и др., 2017; Чудаев, 2003; Эллис, 1975; Giggenbach et al., 1990; Hedenquist, 1990; Sillitoe, 2015). Однако, температурная характеристика зон разгрузки парогидротерм может иметь и самостоятельное значение, поскольку

несет богатейшую информацию о структуре восходящего флюидного потока. Мониторинг температурного поля на активных термальных полях позволяет обнаружить миграцию или установить стабильность положения проницаемых разрывных тектонических нарушений. В ряде случаев изменение температурного поля прямо указывает на влияние эрозионных процессов на распределение водных источников в пределах термоаномалии.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования и изменения температурного поля в зоне разгрузки парогидротерм под влиянием эндогенных и экзогенных факторов на примере термальных полей южной группы Камбального вулканического хребта.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Камбальный вулканический хребет представляет большой интерес как с фундаментальной

научной, так и с практической точек зрения. Это резургентное тектоно-магматическое поднятие в паужетской вулcano-тектонической депрессии (Долгоживущий..., 1980) или в одноименной кальдере по представлениям других авторов (Давыдова и др., 2022). Хребет вытянут в субмеридиональном направлении на 18–20 км и состоит из нескольких стратовулканов от андезитового до базальтового состава ниже-среднеплейстоценового возраста, осложненных интрузиями, экструзивно-субвулканическими телами, моногенными конусами (рис. 1). Сюда к тектоно-магматическому поднятию примыкает голоценовый базальтовый вулкан Камбальный, последнее извержение которого состоялось в марте-апреле 2017 г. (Гирина и др., 2017). На основании изучения пепла вулкана сделано заключение о большой роли газо-гидротермальных процессов в подготовке и протекании этого эксплозивного извержения (Рычагов и др., 2017). По сейсмическим и геоакустическим данным извержение названо необычным, гидротермального типа (Фирстов, Лобачева, 2018).

Камбальный вулканический хребет в настоящее время представляет собой одну из крупнейших на Камчатке геотермальную систему. Ее тепловая мощность сопоставима с таковой Долины Гейзеров, кальдеры Узон, вулканического массива Большой Семячик, Кошелевской гидротермально-магматической системы, и др. (Стратегия..., 2001; Сугробов и др., 2005). Конвективный тепловой поток, поднимающийся из недр Камбального хребта, питает Паужетскую гидротермальную систему и, возможно, другие термоаномалии района (Феофилакт и др., 2021). На основании сейсмической томографии в структуре Камбального вулканического хребта выделены субвертикальные зоны разуплотнения горных пород, насыщенные магматическим или парогазовым флюидом и связанные с глубинным источником тепла (Komzeleva et al., 2021).

Вдоль осевой зоны хребта на протяжении около 10 км происходит разгрузка парогидротерм. Впервые выходы пара обследованы в 1952 г. геологами Министерства геологии и охраны недр СССР (Нехорошев, 1959). Далее было выделено пять групп паровых струй, описано девять групп выходов пара и объединены в две линейные зоны северо-западного простирания (Белоусов и др., 1976). Сделанный в те годы акцент на паровые струи объясняется тем, что главной задачей исследователей была оценка выноса тепла, а пар рассматривался как основной теплоноситель. В связи с расширением задач и проведением геолого-структурных, петрологических, гидрогеохимических и минералогических исследований на Камбальном вулканическом хребте рассмотрены все типы термопроявлений (парогазовые

струи, прогретые грунты, гидротермальные глины, водные источники и грязеводные котлы), локализованные в пределах определенных участков — термальных полей (Белоусов, 1978; Долгоживущий..., 1980; Карпов, 1970; Коробов, 2019; Леонов, 1986; Огородова, 1974). Термальные поля объединены в три группы: Северо-, Центрально- и Южно-Камбальную (Структура..., 1993). Такое деление термальных полей представляется наиболее обоснованным в связи с их структурным положением. Северо-Камбальная группа представляет собой практически непрерывную цепь мелких прогретых площадок с паровыми струйками и бурлящими грязеводными котлами, опоясывающую подножье экструзивного комплекса кислого-среднего состава пика Скалистый; замыкает группу основное термальное поле размером ~150×200 м, расположенное в верховьях ручья Трудный и также приуроченное к этому экструзивному комплексу. Центрально-Камбальная группа включает крупные термальные поля, расположенные как в истоках руч. Фумарольный (бассейн р. Паужетка), так и в верховьях ручья Этамьнк (бассейн оз. Курильского). Эта группа приурочена к базальтовому вулкану Черные Скалы с одноименной вершиной горы (рис. 1). Южно-Камбальная группа располагается в структуре сложного андезитового палеовулкана Термальный и приближена к действующему вулкану Камбальный. Группа включает три крупных термальных поля: Дальнее (ЮКД), Центральное (ЮКЦ) и Ближнее (ЮКБ).

Южно-Камбальное Дальнее термальное поле расположено в широкой U-образной долине ручья Дальний, истока р. Этамьнк, и вытянуто до 1 км (рис. 2). Поле имеет сложную конфигурацию. Основной прогретый участок локализован вдоль русла ручья. Термопроявления представлены парящими грунтами (температура на глубине 0.8 м достигает 101 °С), парогазовыми струями (средние температуры 94–98 °С, максимальные 125 °С), грязеводными и водными котлами (температура не превышает 98 °С), пульсирующими источниками. В центре участка в нескольких метрах от основного ручья выделяется пульсирующий водный котел размером 6×7 м и глубиной воронки более 5 м (замерить точную глубину и конфигурацию подводящего канала не представляется возможным в связи с небезопасными условиями работ). На бортах котла откладывается самородная сера. Данный источник имеет сток с расходом 1.53 л/сек и отличается от других разгрузок физико-химическими характеристиками термальной воды. Вода полупрозрачная (с взвесью самородной серы), слабощелочная (pH=7.9), гидрокарбонатно-сульфатная аммоний-кальциевая, содержит 180 мг/л растворенной ортокремниевой

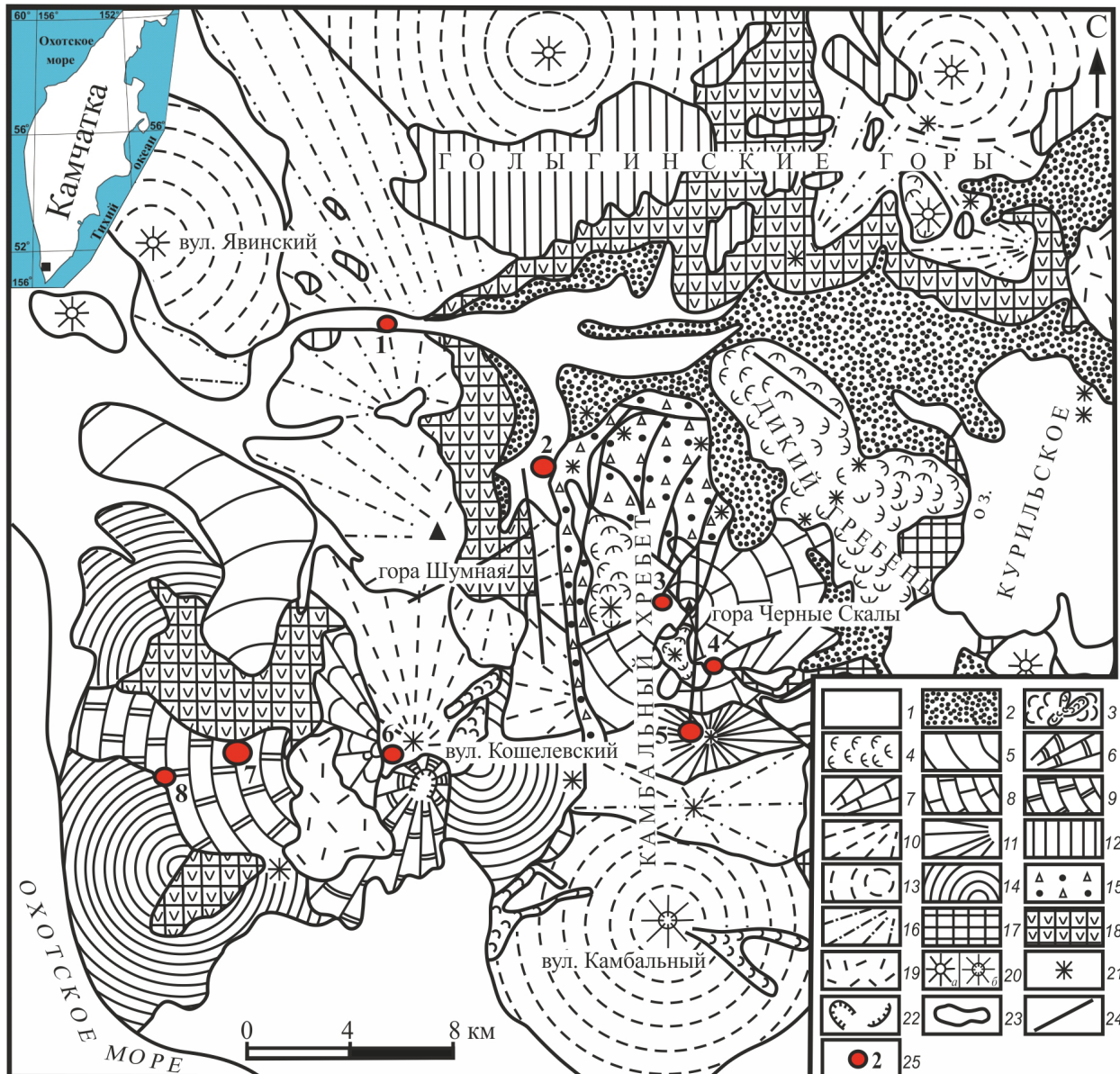


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Паужетского геотермального района по (Белоусов, 1978), с изменениями: 1-3 — голоценовые отложения: 1 — аллювиальные, пролювиальные и ледниковые, 2 — пирокластические пемзовые, 3 — базальты и андезибазальты действующих вулканов и отдельные потоки лав; 4-6 — верхнеплейстоцен-голоценовые отложения: 4 — дацитовые и риолитовые экструзивные куполы и их лавовые потоки, 5 — андезиты Восточно-Кошелевского вулкана, 6 — андезибазальты Центрально-Кошелевского вулкана; 7, 8 — верхнеплейстоценовые отложения: 7 — андезиты вулкана Валентин, 8 — андезибазальты вулкана Черные Скалы; 9-12 — среднеплейстоценовые отложения: 9 — андезиты Западно-Кошелевского вулкана, 10 — базальты Древне-Кошелевского вулкана, 11 — андезибазальты Камбального хребта, 12 — игнимбриты и спекшиеся туфы риодацитов и риолитов Голыгинского хребта; 13 — нижне-среднеплейстоценовые вулканы базальтового и андезибазальтового составов; 14 — нижнеплейстоценовые лавы и туфы базальтов и андезибазальтов; 15, 16 — верхнеплиоцен-средне- и нижнеплейстоценовые отложения: 15 — вулканогенно-осадочные породы паужетской свиты, 16 — лавы и туфы древних вулканов; 17-19 — верхнемиоцен-нижнеплиоценовые осадочно-вулканогенные отложения: 17 — конгломераты и песчаники, реже туфы и лавы базальтов, 18 — миоценовые преимущественно вулканогенные нерасчлененные отложения; 19 — рыхлые отложения различного генезиса и возраста; 20-22 — вулканические морфоструктуры: 20 — конусы вулканов (а — простые, б — с вершинным кратером), 21 — шлаковые конусы, мелкие моногенные вулканы и экструзии, 22 — кальдеры и остатки бортов кальдер; 23 — литологические границы; 24 — разрывные тектонические нарушения; 25 — крупные термопроявления (1 — Первые Горячие Ключи, 2 — Паужетское геотермальное месторождение, 3-5 — группы термальных полей Камбального хребта: 3 — Северо-Камбальная, 4 — Центрально-Камбальная, 5 — Южно-Камбальная; 6, 7 — термоаномалии Кошелевского вулканического массива: 6 — Верхне-Кошелевская, 7 — Нижне-Кошелевская; 8 — Сивучинские термальные источники).

Fig. 1. Schematic geological map of the Pauzhetka geothermal area after (Belousov, 1978) with modifications. 1–3 — Holocene deposits: 1 — alluvial, proluvial, and glacia deposits, 2 — pyroclastic pumice deposits, 3 — basalts and basaltic andesites of active volcanoes and individual lava flows; 4–6 — Upper Pleistocene–Holocene deposits: 4 — dacite and rhyolite extrusive domes and their lava flows, 5 — andesites of East Koshelev Volcano, 6 — basaltic andesites of Central Koshelev Volcano; 7, 8 — Upper Pleistocene deposits: 7 — andesites of Valentin Volcano, 8 — basaltic andesites of Chernye Skaly Volcano; 9–12 — Middle Pleistocene deposits: 9 — andesites of West Koshelev Volcano, 10 — basalts of Older Koshelev Volcano, 11 — basaltic andesites of the Kambalny volcanic range, 12 — ignimbrites and baked tuffs of rhyodacites and rhyolites at the Golygin mountain range; 13 — Lower to Middle Pleistocene volcanoes of basaltic and basaltic andesite compositions; 14 — Lower Pleistocene lavas and tuffs of basalts and basaltic andesites; 15, 16 — Upper Pliocene and Middle to Lower Pleistocene deposits: 15 — volcanogenic-sedimentary rocks of the Pauzhetka Formation, 16 — lavas and tuffs of older volcanoes; 17–19 — Upper Miocene to Lower Pliocene sedimentary-volcanogenic deposits: 17 — conglomerates and sandstones, less frequently basaltic tuffs and lavas, 18 — Miocene, mostly volcanogenic unstratified deposits; 19 — loose sediments of varying genesis and age; 20–22 — volcanic morphostructures: 20 — cones of volcanoes (*a* — simple, *b* — with summit crater), 21 — cinder cones, minor monogenic volcanoes and extrusive bodies, 22 — calderas and remains of caldera walls; 23 — lithologic boundaries; 24 — faults; 25 — large thermal occurrences: 1 — Pervye Goryachie Klyuchi, 2 — Pauzhetka geothermal field, 3–5 — groups of thermal fields of the Kambalny volcanic range: 3 — North Kambalny group, 4 — Central Kambalny group, 5 — South Kambalny group, 6, 7 — thermal anomalies in the Koshelev volcanic massif: 6 — Upper Koshelev anomaly, 7 — Lower Koshelev anomaly, 8 — Sivuchinskies thermal springs.

кислоты, общая минерализация 1.2 г/л. Другие водные источники нейтральные или слабокислые, в основном, бессточные (образуются за счет нагрева грунтовой воды парогазовой смесью), сульфатные, с содержанием ортокремниевой кислоты до 300 мг/л. Общая минерализация варьирует в широких пределах: 0.1–4.3 г/л. Концентрации аммония достигают 900 мг/л, что свидетельствует о формировании источников под влиянием газов, в состав которых, помимо углекислого газа и сероводорода, входят соединения азота.

На обоих склонах долины ручья Дальний, вплоть до водораздела, расположены термальные участки меньшего размера, на которых преобладают горячие грунты, парогазовые струи и редкие грязеводные котлы, образованные за счет конденсации пара и нагрева грунтовых вод.

Исходные породы долины ручья Дальний, представленные андезитами и андезибазальтами, изменены гидротермально-метасоматическими процессами до вторичных кварцитов, опалитов и аргиллизитов (Фролова и др., 2020).

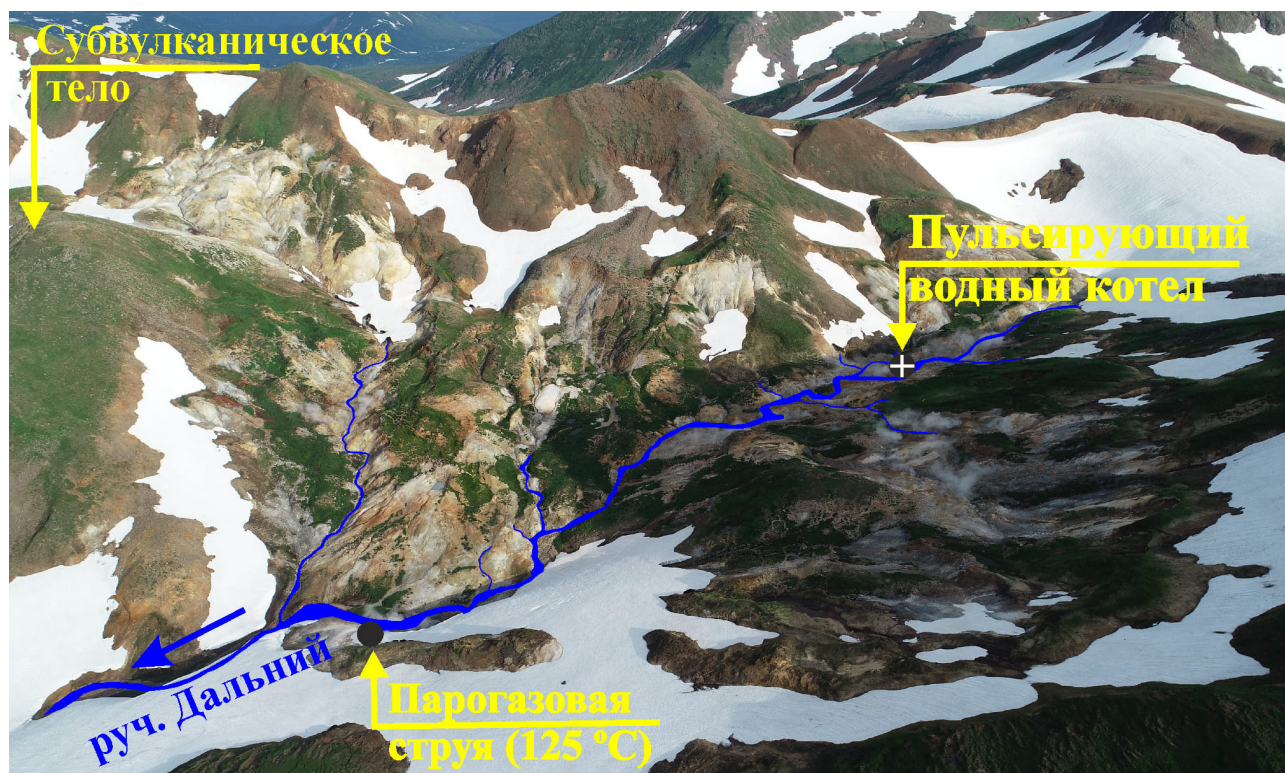


Рис. 2. Фотография Южно-Камбального Дальнего термального поля (фото М.С. Чернова).

Fig. 2. Photo of the South-Kambalny Far thermal field (photo by M.S. Chernov).

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. Таким образом, совокупность геологических и гидрогеохимических данных свидетельствует о том, что долина ручья Дальний трассирует зону разрывных тектонических нарушений субмеридионального простирания, а размеры термоаномалии в недалеком прошлом (по-видимому, в раннем-среднем голоцене) были значительно больше.

Южно-Камбальное Центральное термальное поле локализовано в кольцевой морфоструктуре диаметром около 1000–1200 м (рис. 3), представляющей собой, по-видимому, эродированный кратер одного из конусов вулкана Термальный выделенного (Нехоршев, 1959). 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 гидротермальными глинами (Фролова и др., 2020), по периферии поля распространены серные бугры с опал-халцедоновыми отложениями (Большаков и др., 2021). Общие размеры термального поля ~600×600 м, центральная часть (~200×300 м) является современной термоаномалией. Принципиально она имеет такое же строение, как и ЮКД,

но отличается наличием крупного (7×9 м) и нескольких более мелких кипящих озер и пульсирующих источников. Термальная вода озер и пульсирующих источников характеризуется следующими параметрами: температура 93–98 °С, рН=7.3–8.5, Eh от –200 до +130, общая минерализация от 0.7 до 4.2 г/л. Воды гидрокарбонатно-сульфатные кальций-аммониевые (содержание аммония достигает 1 г/л). На относительно спокойных термальных площадках грязеводные котлы с кислой водой перемежаются с газоводными чистыми источниками с нейтральными и слабощелочными растворами (Рычагов и др., 2020). Щелочные воды выделяются повышенными концентрациями Li, B, P, Sc, As, а также Y и других редкоземельных элементов. Установлено, что в основании толщ гидротермальных глин, покрывающих термальное поле единым чехлом, образуются карбонатные конкреции и происходит интенсивная карбонатизация и цеолитизация исходных андезитов (Рычагов и др., 2021). В опал-халцедоновых отложениях на поверхности термального поля обнаружены сульфиды цветных металлов, мышьяка и сурьмы (Огородова, 1974), фосфаты иттрия и др. редких элементов (Рычагов и др., 2021). Таким образом, согласно гидрогеохимическим и минералогическим данным, по нашему мнению, на ЮКЦ происходит разгрузка напорных щелочных термальных вод, формирующихся, по-видимому, под влиянием глубинного металлоносного флюида.



Рис. 3. Фотография Южно-Камбального Центрального термального поля (фото М.С. Чернова).

Fig. 3. Photo of the South-Kambalny Central thermal field (photo by M.S. Chernov).

Южно-Камбальное Ближнее термальное поле расположено в 2.5 км к северу от ЮКЦ и приурочено к глубоко врезанной котловине правого притока ручья Кратерный (рис. 4). Поле вытянуто с запада на восток до 650 м и сужается к югу. 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» (рис. 4), 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, мелкими парогазовыми струями (температуры не выше 98 °С), теплыми водными и кипящими грязеводными котлами. Согласно общему химическому составу преобладают кислые сульфатные аммониевые воды с низкой минерализацией (до 0.6–0.8 г/л), что свидетельствует об их формировании вследствие конденсации парогазовой смеси. Но некоторые газоводные источники с чистой водой имеют другие характеристики: гидрокарбонатно-сульфатный

состав также с преобладанием аммония среди катионов, pH=7.5–8.5, отрицательные значения Eh и относительно высокую минерализацию (до 1.5 г/л). Такие разгрузки могут указывать на влияние глубинных щелочных термальных вод на формирование ЮКБ, по аналогии с ЮКЦ.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика температурной съемки грунтов на термальных полях Камчатки была предложена и отработана в 1950–1960-х гг. А.С. Нехорошевым, В.В. Аверьевым и В.Г. Ренне (Паужетские..., 1965) и в дальнейшем широко использовалась другими исследователями при изучении современных гидротермальных систем Камчатки (Гидротермальные..., 1976). Методика предусматривает измерение температур на глубине 0.8–1.0 м в сухой период (август–сентябрь), что позволяет максимально исключить влияние сезонных колебаний уровня холодных грунтовых вод, а также сезонного и суточного изменения температуры приземного слоя воздуха на восходящий тепловой поток.

Измерения температуры грунтов проводились с помощью, комплекта заводских термопар и

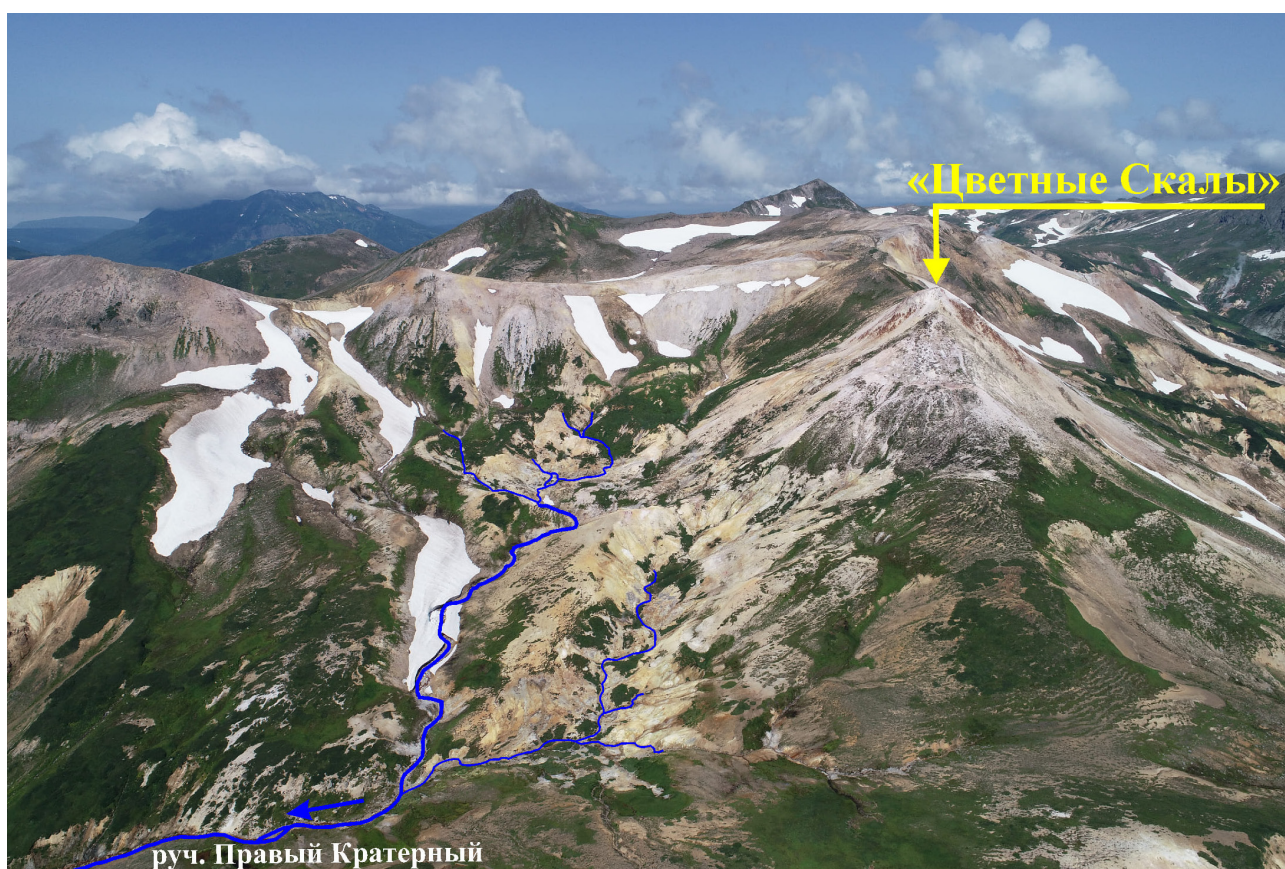


Рис. 4. Фотография Южно-Камбального Ближнего термального поля (фото М.С. Чернова).

Fig. 4. Photo of the South-Kambalny Near thermal field (photo by M.S. Chernov).

СТРУКТУРА И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

портативного мультиметра, которые калибровались регулярно. Для проходки шпуров использовалась металлическая шпилька диаметром 10 мм. Точность измерений не зависела от температуры воздуха, времени суток и других факторов и составила 0.5 °С. Для привязки пикетов на мест-

ности использовался GPS-навигатор Garmin 62s, сточностью 3–5 м. Сеть съемки составила 40×40 м с сгущением до 20×20 м на наиболее прогретых участках. На площади ЮКД измерения выполнены в 285 точках (рис. 5а), ЮКЦ — в 320 точках (рис. 5б), ЮКБ — в 400 точках (рис. 5в).

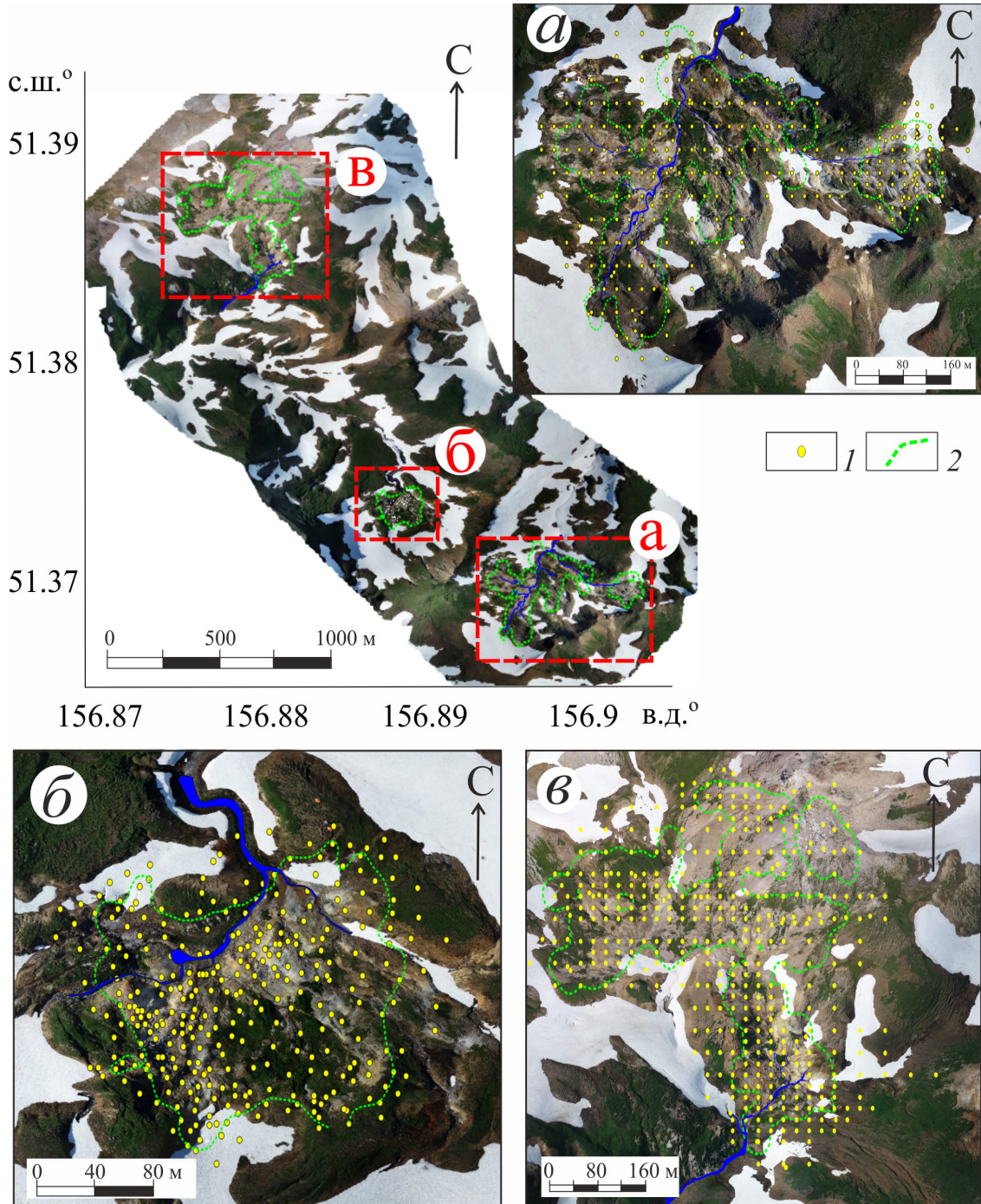


Рис. 5. Схема расположения термальных полей и точек температурной съемки: *a* — Южно-Камбального Дальнего термального поля в августе 2021 г.; *б* — Южно-Камбального Центрального термального поля в августе 2017 г.; *в* — Южно-Камбального Ближнего термального поля в августе 2021 г. Ортофотоплан М.С. Чернова. 1 — фактические точки измерений; 2 — изотерма 20 °С.

Fig. 5. Location scheme of thermal fields and temperature survey points: *a* — South-Kambalny Far thermal field in August 2021; *б* — South-Kambalny Central thermal field in August 2017; *в* — South-Kambalny Near thermal field in August 2021. Orthophotoplane by M.S. Chernov. 1 — actual measurement points; 2 — 20 °C isotherm.

Определение абсолютных высот расположения высокотемпературных участков термальных полей проведено геодезической GPS станцией Leica GR 10 с антенной AR 10 с точностью 7 см (данные предоставлены Ю.Ю. Букатовым).

Термальные поля оконтурены изотермой 20 °С и представлены на схемах в координатной системе WGS-84.

ФАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурное поле ЮКД приурочено к долине ручья Дальний и имеет сложную конфигурацию (рис. 6а). Основной участок размером примерно 500×600 м включает несколько высокотемпературных аномалий — линейную, вытянутую вдоль ручья Дальний, крупное изометричное поле в левом борту ручья и отдельные мелкие аномалии по правому борту долины. Линейная зона включает наиболее мощные разгрузки термальных вод (центральный пульсирующий водный котел, описанный выше) и парогазовые струи, температура одной из которых (в северной части зоны (рис. 6а)) составляет 125 °С. В правом борту ручья ближе к водоразделу расположена изометричная в плане крупная площадка прогретых грунтов размером 170×200 м. Грунты прогреты за счет выходов многочисленных парогазовых струй и образования мелких грязеводных котелков вследствие конденсации пара в грунтовых водах. Наличие на этой площадке центрального участка с высокими температурами грунта (до 101 °С) и серии мелких аномалий по ее периферии может свидетельствовать о локализованном выходе теплоносителя в форме субвертикального канала. Линейная термоаномалия основного участка трассирует зону разрывных тектонических нарушений, вытянутую вдоль ручья Дальний.

Сравнительная характеристика температурного поля ЮКД, полученного нами, и измеренного В.М. Сугробовым с коллегами 55 лет назад (рис. 6б), показала следующее. Конфигурация температурных полей 2021 г. и 1965 г. принципиально схожая: выделяются основные прогретые участки вдоль ручья Дальний и по его бортам. Но размеры поля в целом и его отдельных участков на съемке 2021 г. значительно больше. В 1965 г. также не отмечено высокотемпературной парогазовой струи и нет описания центрального пульсирующего водного источника (однако на схеме указан водный котел в том же районе по правому борту ручья). Некоторые различия могут быть объяснены меньшей детальностью температурной съемки в те годы, отсутствием точных привязок на местности, влиянием различных сезонных условий, и др. причинами.

Но, поскольку основным фактором, который определяет формирование термального поля, является восходящий тепловой поток, то увеличение размеров термоаномалии, появление новых горячих участков и т.д., — говорит о повышении интенсивности геотермальных процессов на площади ЮКД.

Температурное поле ЮКЦ по данным современной детальной съемки (2017 г.) имеет близкую к изометричной форму: по изотерме 20 °С имеет размеры 200 на 160 м, по изотерме 50 °С — 150 на 130 м (рис. 7а). Наиболее высокотемпературные участки также образуют относительно изометричные площадки внутри общего поля. Такое строение термального поля согласуется с общей концепцией формирования геологической структуры ЮКЦ: локализованный тепловой поток поднимается по системе блоков разуплотненных пород в центре эродированного вулканического кратера (Рычагов и др., 2020; Фролова и др., 2021). Определяющую роль в восходящем потоке играют напорные щелочные термальные воды, насыщенные углекислым газом, сероводородом, соединениями азота, что в совокупности с другими данными свидетельствует о наличии глубинного источника тепла.

По результатам температурной съемки грунтов ЮКЦ в 1965 г. (рис. 7б) температурное поле вытянуто с юга на север, имеет меньшие размеры по сравнению с результатами съемки 2017 г. Внутреннее строение также существенно отличается от распределения современных термоаномалий: наиболее прогретые участки локализованы в поле «холодных» пород, и сосредоточены в западной половине поля, в отличие от более равномерного и широкого распределения горячих участков по данным съемки 2017 г. Можно отметить также перераспределение грязеводных котлов на территории термоаномалии и увеличение количества концентрированных паровых струй. Маловероятно чтобы исследователи в 1960-х годах не зафиксировали наличие термоаномалий в восточной части поля по каким-либо техническим или природным условиям. Таким образом, термальное поле за прошедшие 52 года существенно увеличилось в размерах и приобрело вид единой близкой к изометричной аномалии с относительно равномерным распределением высокотемпературных участков. Эти данные свидетельствуют о увеличении мощности конвективного теплового потока в пределах ЮКЦ за пять десятилетий.

Температурное поле ЮКБ состоит из нескольких горячих площадок, объединенных изотермой 20 °С (рис. 8а). Конфигурация поля сложная. Основные термоаномалии приурочены не к ручью Правый Кратерный, а к водораздельным участкам и склонам V-образной долины.

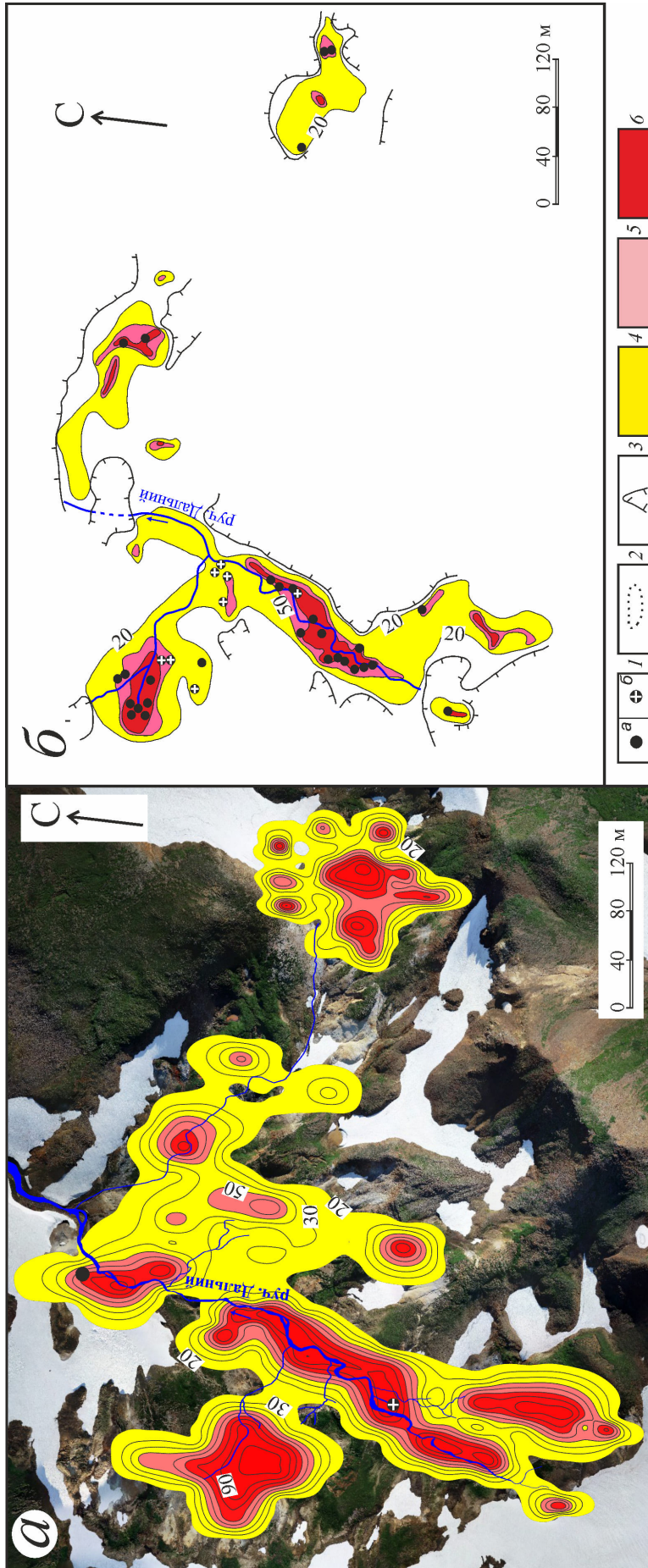


Рис. 6. Схема распределения температур грунтов в пределах Южно-Камбалы Far thermal field: *a* — по результатам съемки в августе 2021 г. Шаг изолиний температурной съемки 10 °С; *b* — по результатам съемки в июле 1965 г. (Белюсов и др., 1976). *1a* — паровые струи; *2* — водяные и грязевые котлы; *3* — участки парящего грунта; *4* — границы снежников; *5* — участки с температурами от 20 °С до 50 °С на глубине 1 м; *6* — участки с температурами от 50 °С до 70 °С на глубине 1 м; *б* — участки с температурами более 70 °С на глубине 1 м.

Fig. 6. Scheme of distribution of ground temperatures within the South-Kambalny Far thermal field: *a* — according to the results of the survey in August 2021. Temperature survey isoline step 10 °С, *b* — based on the results of the survey in July 1965 (Belousov et al., 1976). *1a* — water and mud boilers; *2* — areas of steaming ground; *3* — boundaries of snowfields; *4* — sections with temperatures from 20 °С to 50 °С at a depth of 1 m; *5* — areas with temperatures from 50 °С to 70 °С at a depth of 1 m; *6* — areas with temperatures over 70 °С at a depth of 1 m.

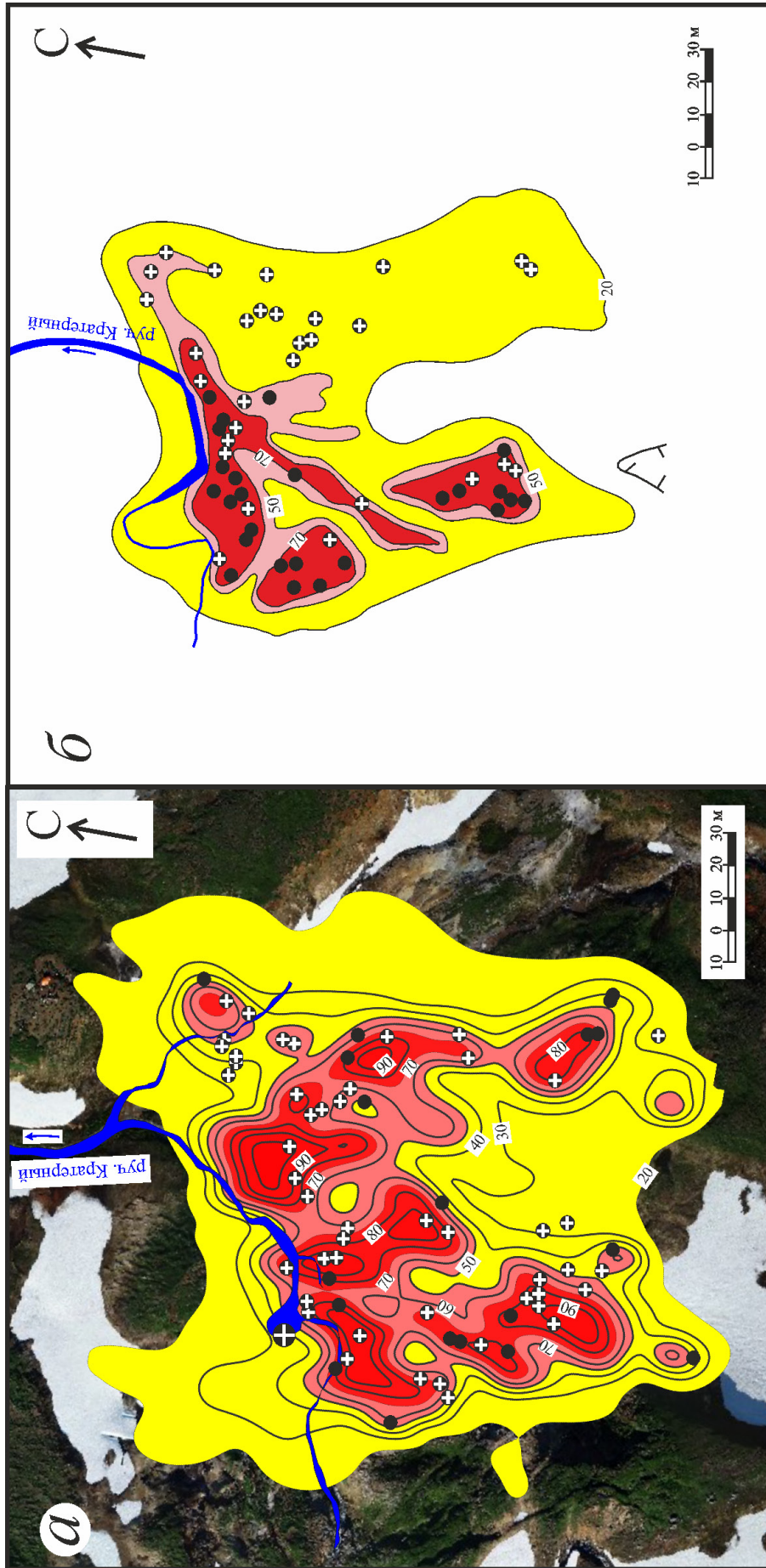


Рис. 7. Схема распределения температур грунтов в пределах Южно-Камбального Центрального термального поля: *а* — по результатам съемки в августе 2017 г. Шаг изолиний температурной съемки 10 °С; *б* — по результатам съемки в июле 1965 г. (Белоусов и др., 1976). Условные обозначения см. на рис. 6.

Fig. 7. Scheme of ground temperature distribution within the South-Kambalny Central thermal field: *a* — based on the results of the survey in August 2017. Step of temperature survey isoline is 10 °С; *б* — based on the results of the survey in July 1965 (Belousov et al., 1976). For symbols see Fig. 6.

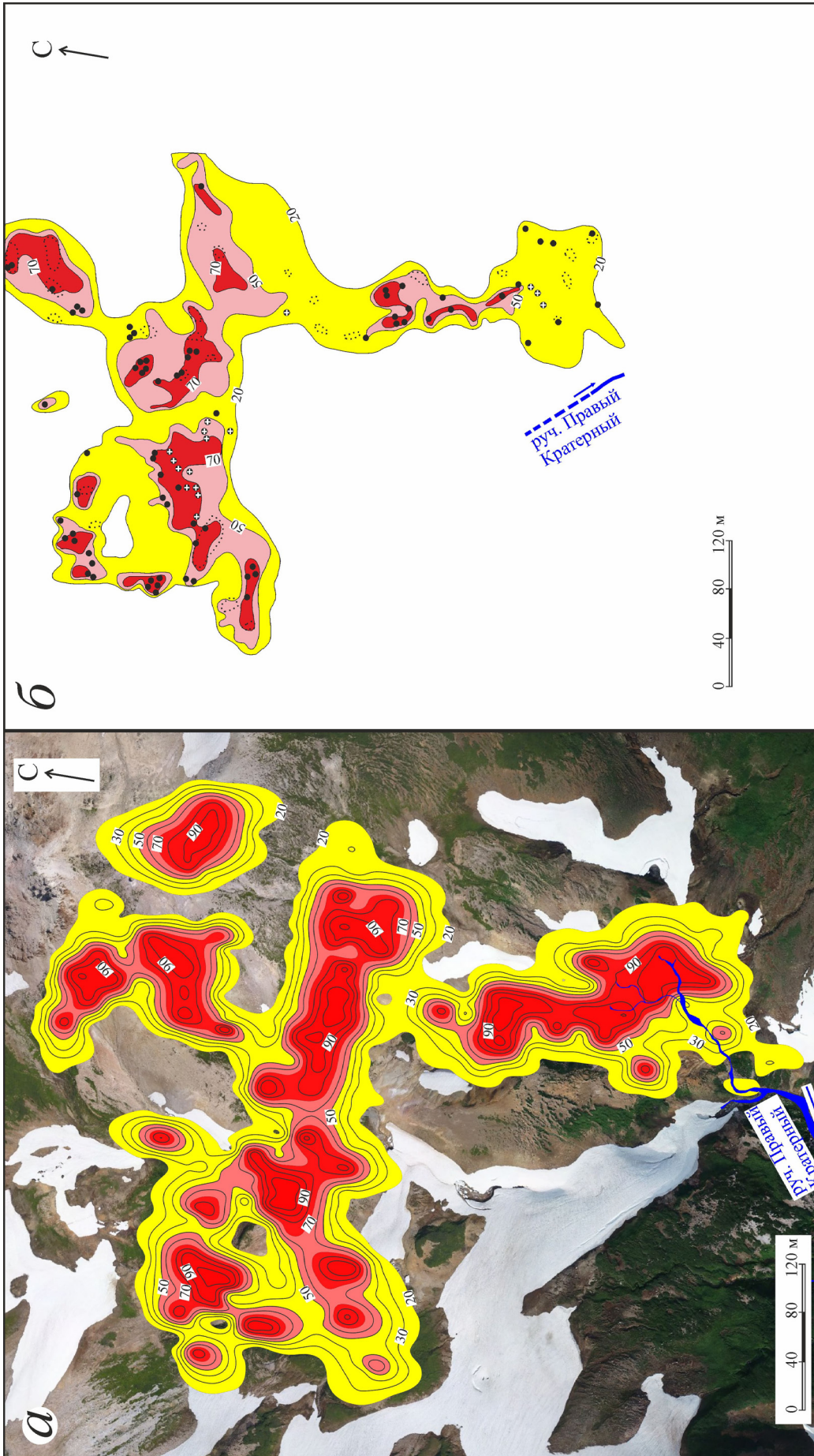


Рис. 8. Схема распределения температур грунтов в пределах Южно-Камбального Ближнего термального поля: а — по результатам съемки в августе 2021 г. Шаг изолиний температурной съемки 10 °С.; б — по результатам съемки в июле 1965 г. (Белюсов и др., 1976). Условные обозначения см. на рис. 6.

Fig. 8. Scheme of ground temperature distribution within the South-Kambalny Near thermal field: а — based on the results of the survey in August 2021. Step of temperature survey isoline is 10 °С.; б — based on the results of the survey in July 1965 (Belousov et al., 1976). For symbols see Fig. 6.

В западной части поля образован относительно изометричный высокотемпературный участок, связанный с остальным полем широтной линейной зоной. Эта зона, а также два северных участка пространственно тяготеют к экстрезии «Цветные Скалы». Общие размеры поля ~500×650 м. Грунты прогреты до 105 °С. Прогрев грунтов происходит за счет выходов многочисленных мелких струй пара и рассеянного парения. Теплые водные и мелкие кипящие грязеводные котлы находятся в пределах этих же аномальных участков и формируются за счет конденсации пара в грунтовых водах. Но отмечаются и газодные источники, которые, как отмечено нами ранее, могут указывать на влияние глубинных термальных вод на формирование ЮКБ. Таким образом, температурное поле ЮКБ формируется вследствие существования приповерхностной зоны пара, а также, возможно, за счет поступления дериватов глубинного газодного флюида.

В целом, конфигурация температурного поля ЮКБ согласно измерениям 2021 года в сравнении с предыдущей съемкой сохранилась прежней (рис. 8б). Увеличилась общая площадь поля и размеры наиболее прогретых участков (> 70 °С), образовались новые термоаномалии в северной части структуры. Термоаномалии по данным съемки 2021 г. стали более контрастными: существенно сократилась площадь грунтов с температурами 50–70 °С за счет расширения участков с температурами более 70 °С, границы между этими зонами четкие, резкие. Это свидетельствует как об увеличении мощности конвективного теплового потока, так и его консолидации в определенных геологических структурах — в экстрезивном комплексе «Цветные Скалы» и в субширотной тектонической зоне, которая по геологическим данным служит границей между подстилающими андезитами и прорывающими их кислыми экстрезивными породами. Таким образом, температурное поле ЮКБ формируется под воздействием, прежде всего, эндогенных процессов — разгрузки термальных вод и парогазового флюида в зонах трещиноватости на границе породных комплексов и по границам блоков экстрезивного комплекса «Цветные Скалы». Влияние экзогенных факторов (в частности, широко проявленных оползневых процессов в глубоко врезанной долине ручья Правый Кратерный) на структуру термального поля, вероятно, может сказываться, но весьма локально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведения температурной съемки грунтов на термальных полях южной группы Камбального вулканического хребта

и сравнительной характеристики результатов исследований с аналогичными данными, полученными полвека назад, установлены закономерности формирования и тенденции изменения температурных полей.

Формирование температурных полей определяется особенностями геологического строения каждого термального поля. Температурное поле ЮКД локализовано в пределах термовыводящей зоны разрывных тектонических нарушений, трассируемых ручьем Дальний, и поперечных разломов, оперяющих эту зону (разломы также контролируют разгрузку геотермального теплоносителя). Отдельная крупная изометричная термоаномалия в правом борту ручья может быть образована вследствие внедрения геотермального теплоносителя по субвертикальному каналу. На данном участке термального поля нами и И.А. Бойковой (устное сообщение) были обнаружены субвулканические тела основного состава, контактовые зоны которых могут быть проницаемы для восходящего теплового потока.

Температурное поле ЮКЦ образует единую изометричную аномалию в центральной части морфоструктуры, что подтверждает приуроченность термального поля к эродированному кратеру, как одной из моногенных построек сложного палеовулкана Термальный (Рычагов и др., 2020; Фролова и др., 2020). Конвективный тепловой поток в виде напорных щелочных гидротерм локализован в наиболее проницаемой центральной части кратера, как было показано в работах (Рычагов и др., 2020, 2021).

Температурное поле ЮКБ имеет сложное строение и определяется основной системой проницаемых для теплового потока зон, сосредоточенных вокруг и внутри экстрезивного комплекса «Цветные Скалы», а также в зоне сочленения этого комплекса с подстилающими андезитами.

Сравнительная характеристика результатов температурных съемок, полученных с разницей в 50–55 лет, также позволила сделать следующие выводы. С течением времени существенно увеличились размеры температурных полей на всех описанных выше геологических структурах южной группы Камбального вулканического хребта. Увеличилась площадь наиболее горячих участков термоаномалий. Максимальные температуры грунтов также возросли на 10 °С. Отдельные термопроявления (кипящие и пульсирующие водные котлы и парогазовые струи) увеличили свои расходы и (или) температуру. Обнаружены новые термоаномалии. Маловероятно, что эти изменения могут быть связаны с различиями в методике температурных съемок (практически она идентична) или погодными и др. условиями (выбиралось одно время года).

Полученные данные свидетельствуют о высокой динамике геотермальных процессов, увеличении мощности конвективного теплового потока и его локализации в определенных геологических структурах южной части Камбального вулканического хребта. Таким образом, изучение температурных полей и их мониторинг, помимо использования этих данных для решения гидрогеохимических, геофизических и др. задач, могут иметь значение при восстановлении геологического строения и эволюции геотермальных систем.

Авторы выражают глубокую признательность всем участникам структурно-геофизического и геохимического отрядов Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (А.А. Нуждаеву, О.В. Кравченко, М.С. Чернову, Р.А. Кузнецову, И.Е. Большакову, А.Б. Ермолинскому) за содействие в проведении полевых исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00019.

Список литературы [References]

- Басков Е.А., Суриков С.Н.* Гидротермы Тихоокеанского сегмента Земли. М.: Недра, 1975. 172 с. [*Baskov E.A., Surikov S.N.* Hydrotherms of the Pacific Segment of the Earth. Moscow: Nedra, 1975. 172 p. (in Russian)].
- Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 175 с. [*Belousov V.I.* Geology of geothermal fields in the areas of modern volcanism. Moscow: Nauka, 1978. 175 p. (in Russian)].
- 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 [*Belousov V.I., Sugrobov V.M., Sugrobova N.G.* Geological structure and hydrogeological features of the Pauzhet hydrothermal system // Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Vladivostok: DVNTs of the USSR Academy of Sciences, 1976. P. 23–57 (in Russian)].
- Большаков И.Е., Фролова Ю.В., Житова Е.С. и др.* Агаты современных термальных полей Камчатки // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 117–120 [*Bolshakov I.E., Frolova Y.V., Zhitova E.S. et al.* Agates of modern thermal fields of Kamchatka // Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVI annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day, March 29–30, 2021 Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2021. P. 117–120 (in Russian)].
- Вакин Е.А., Декусар З.Б., Серезников А.И., Спиченкова М.В.* Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 58–84 [*Vakin E.A., Dekusar Z.B., Serezhnikov A.I., Spichenkova M.V.* Hydrotherms of the Koshelev volcanic massif // Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1976. P. 58–84 (in Russian)].
- Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки.* Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с. [*Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka.* Vladivostok: DVNTS AS SSO, 1976. 284 p. (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-263-267> [*Girina O.A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A.* Eruption of Kambalny volcano in 2017 // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. T. 14. № 2. P. 263–267 (in Russian)].
- Давыдова В.О., Биндеман И.Н., Шеклеина 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. <https://doi.org/10.31857/S0869590322050028> [*Davydova V.O., Bindeman I.N., Shchekleina M.D., Rychagov S.N.* Pauzhetka Caldera (South Kamchatka): Exploring Temporal Evolution and Origin of Voluminous Silicic Magmatism // Petrology. 2022. V. 5. № 30. P. 462–478. <https://doi.org/10.1134/s0869591122050022>].
- Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки.* М.: Наука, 1980. 172 с. [*Long-lived center of endogenous activity of South Kamchatka.* Moscow: Nauka, 1980. 172 p. (in Russian)].
- Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нуждаев А.А.* Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41–56. <https://doi.org/10.7868/S0203030616030044> [*Kalacheva E.G., Rychagov S.N., Koroleva G.P., Nuzhdaev A.A.* Geochemistry of vapor-hydrotherms of the Koshelevsky volcanic massif (South Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. V. 10. № 3. P. 188–202. <https://doi.org/10.1134/S0742046316030040>].
- Карпов Г.А.* Псевдосферовые агрегаты арагонита на современном термальном поле Камбального хребта (Камчатка) // Минералогия гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов. М.: Наука, 1970. С. 157–165 [*Karpov G.A.* Pseudospherical aggregates of aragonite at the modern thermal field of the Kambal Ridge (Kamchatka) // Mineralogy of hydrothermal systems of Kamchatka and the Kuril Islands. Moscow: Nauka, 1970. P. 157–165 (in Russian)].
- Коробов А.Д.* Гидротермальный литогенез в областях наземного вулканизма. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2019. 120 с. [*Korobov A.D.* Hydrothermal lithogenesis in the areas of terrestrial volcanism. Saratov: Saratov University Publishing House, 2019. 120 p. (in Russian)].

- Леонов В.Л.* Региональные структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2001. № 5. С. 32–47 [*Leonov V.L.* Regional structural positions of high-temperature hydrothermal systems in Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2001. № 5. P. 32–47].
- Нехорошев А.С.* Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке // Бюллетень Вулканологической станции. М.: АН СССР, 1959. № 28. С. 23–32 [*Nekhoroshev A.S.* Hydrothermal activity of the Kambalnaya Ridge area in southern Kamchatka // Bulletin of the Volcanological Station. Moscow: AN SSSR, 1959. № 28. P. 23–32 (in Russian)].
- Огородова А.С.* Особенности гидротермального процесса в зоне кислотного выщелачивания // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 173–184 [*Ogorodova A.S.* Features of the hydrothermal process in the acid leaching zone // Hydrothermal mineral-forming solutions of the regions of active volcanism. Novosibirsk: Nauka, 1974. P. 173–184 (in Russian)].
- Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с. [Pauzhetka hot waters in Kamchatka. Moscow: Nauka, 1965. 208 p. (in Russian)].
- Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с. [Structure of hydrothermal system. Moscow: Nauka, 1993. 298 p. (in Russian)].
- Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Камчатки, классификация и прогнозная оценка // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука, 1979. С. 26–35 [*Sugrobov V.M.* Geothermal resources of Kamchatka, classification and prognostic assessment // Study and utilization of geothermal resources in volcanic areas. Moscow: Nauka, 1979. P. 26–35 (in Russian)].
- 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, посвященной Дню вулканолога, 2020 г. / Гл. редактор д.г.-м.н. А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 198–201 [*Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Nuzhdaev A.A. et al.* South Kambal thermal field: structural position, hydrogeochemical and lithological characteristics // Volcanism and related processes. Proceedings of the XXIII Annual Scientific Conference dedicated to the Day of Volcanologist, 2020 / Chief Editor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences A.Yu. Ozerov. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2020. P. 198–201 (in Russian)].
- 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 [*Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Sergeeva A.V., Nuzhdaev I.A.* Ash composition of Kambalny volcano (eruption 2017) // Vestnik KRAUNTs. Earth Sciences. 2017. V. 36(4). P. 13–27 (in Russian)].
- Рычагов С.Н., Сандимирова 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 <https://doi.org/10.31857/S0203030621040052> [*Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Chernov M.S. et al.* Composition, structure, and origin of carbonate nodules of the South-Kambal Central Thermal Field (Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2021. V. 15. № 4. P. 258–272. <https://doi.org/10.1134/S0742046321040059>].
- Стратегия развития топливно-энергетического потенциала Дальневосточного экономического региона до 2020 г. Владивосток: Дальнаука, 2001. 112 с. [Strategy for the Development of Fuel and Energy Potential of the Far Eastern Economic Region until 2020. Vladivostok: Dalnauka, 2001. 112 p. (in Russian)].
- Сугробов В.М., Кононов В.И., Постников А.И.* Прогнозные геотермальные ресурсы областей современного вулканизма Камчатки и Курильских островов: научные и прикладные аспекты // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 9–24 [*Sugrobov V.M., Kononov V.I., Postnikov A.I.* Prognostic geothermal resources of the areas of modern volcanism of Kamchatka and the Kuril Islands: scientific and applied aspects // Geothermal and mineral resources of the areas of modern volcanism. Petropavlovsk-Kamchatsky: OTTISK, 2005. P. 9–24 (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.31857/S020303062101003X> [*Feofilaktov S.O., Rychagov S.N., Loginov V.A. et al.* Depth structure of the area of the Pauzhetskaya hydrothermal system (South Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2021. V. 15. № 1. P. 35–50. <https://doi.org/10.1134/S0742046321010103>].
- 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 [*Feofilaktov S.O., Rychagov S.N., Bukatov Yu.Yu. et al.* New data on the structure of the hydrothermal unloading zone in the area of the Vostochno-Pauzhetsky thermal field (South Kamchatka) // Volcanology and Seismology. 2017. V. 11. № 5. P. 353–366].
- 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. 15. № 1. С. 36–51 [*Frolova Yu.V., Rychagov S.N., Chernov M.S. et al.* Engineering-geological aspects of volcanic rocks alteration under the acid leaching in the South Kambalny thermal fields (South Kamchatka) // Engineering Geology. 2020. V. 15. № 1. P. 36–51].
- 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

- [Firstov P.P., Lobacheva M.A. Wave disturbances in the atmosphere accompanying the eruption of the Kambalny volcano (Kamchatka) in 2017 // Vestnik KRAUNTS. Earth Sciences. 2018. V. 38(2). P. 45–58 (in Russian)].
- Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 203 с. [Chudaev O.V. Composition and conditions of formation of modern hydrothermal systems of the Russian Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2003. 203 p. (in Russian)].
- Эллис А. Количественная интерпретация геохимических данных гидротермальных систем. Изучение и использование геотермических ресурсов. М.: Мир, 1975. С. 272–299 [Ellis A. Quantitative interpretation of geochemical data from hydrothermal systems. Study and utilization of geothermal resources. Moscow: Mir, 1975. P. 272–299].
- Giggenbach W.F., Garcia N.P., Londono A. et al. The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharge from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system, Colombia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1990. V. 42. Iss. 1–2. P. 13–39.
- Hedenquist J.W. The thermal and geochemical structure of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand // Geothermics. 1990. V. 19. № 2. P. 151–185.
- 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. Article 107392.
- Sillitoe R.H. Epithermal paleosurfaces // Mineral Deposita, 2015. V. 50. P. 767–793.

STRUCTURE AND CHANGES IN THERMAL FIELDS OF THE SOUTHERN GROUP OF THE KAMBALNY VOLCANIC RIDGE (KAMCHATKA) BASED ON GROUND TEMPERATURE SURVEYS

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

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia;
e-mail: serg415@kscnet.ru; rychn@kscnet.ru*

Received September 19, 2023; revised January 22, 2024; accepted March 25, 2024

Ground temperature survey at three thermal fields of the southern group of the Kambalny volcanic ridge (South Kambalny Near, Central and Far thermal fields) was carried out. Their current state is characterized. The formation of temperature anomalies is determined by the peculiarities of the geological structure of each thermal field. The maps of temperature surveys obtained in 2021 and 1965 are compared. Changes in the conditions of convective heat flow unloading in the geologic structure of thermal fields are shown. The size of temperature fields on all geologic structures of the southern group of the Kambalny volcanic ridge have significantly increased over time. The area of the most warmed areas of thermoanomalies has increased. The maximum ground temperatures increased by 10 °C on average. Some thermoanomalies (boiling and pulsating water boilers and vapor-gas jets) increased their flow rates and (or) temperature. New warmed areas within the thermal anomalies were discovered.

Keywords: volcanic ridge, thermal field, temperature survey, heat flow.