

ГАББРО И ДОЛЕРИТ В МОРФОСТРУКТУРЕ ЮЖНО-КАМБАЛЬНОГО ДАЛЬНЕГО ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ (КАМЧАТКА)

© 2026 И.А. Бойкова, С.Н. Рычагов

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: bira06@yandex.ru; rychn@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2026; после доработки 16.06.2026; принята в печать 27.06.2026

Впервые в научных исследованиях геотермальных проявлений Камбального вулканического хребта на площади Южно-Камбального Дальнего термального поля выделены интрузивные породы субвулканической фации (габбро и долерит), образующие крутопадающие штокообразные тела с тектоническими границами. Рассмотрен состав и характер вторичных изменений габбро и долерита. Предполагается, что они могут служить источником рудного вещества в современных гидротермально-метасоматических процессах. Составлена схематическая геологическая карта Южно-Камбального Дальнего термального поля. Горными породами, вмещающими термальное поле, являются андезибазальты: потоки массивных и агломератовых лав падают полого (в среднем, 18–20°) на северо-запад, что указывает на расположение центра вулканических извержений на юго-востоке за пределами современной разгрузки парогидротерм. Показано, что гидротермально измененные породы распространены в пределах контура температурной аномалии и имеют современное происхождение за счет разгрузки геотермального пара и термальных вод по основному линейному разлому и системе оперяющих его разрывных тектонических нарушений.

Ключевые слова: вулканический хребет, термальные поля, геологическая структура, габбро, долерит.

ВВЕДЕНИЕ

Камбальный вулканический хребет расположен в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном (рудном) районе Южной Камчатки (рис. 1). Вулканический хребет представляет собой резургентное тектоно-магматическое поднятие в Паужетской вулcano-тектонической депрессии (Долгоживущий..., 1980) или в одноименной кальдере (Давыдова и др., 2022). В то же время, эта геологическая структура является одной из наиболее крупных геотермальных систем Камчатки (Стратегия..., 2001; Сугробов, 1979). Несмотря на большой интерес исследователей к Камбальному вулканическому хребту, геологические данные получены более 50–70 лет назад, носят общий характер и весьма неоднозначны (Белоусов, 1978; Государственная..., 1984; Долгоживущий..., 1980; Леонов, 1989; Нехорошев, 1959 и др.). Для термальных полей приведены только гидрогеотермические схемы, вынесенные на глазомерную топографическую основу (Белоусов и др., 1976).

В связи с проведением комплексных исследований в районе Южной группы термальных полей Камбального хребта, включающих структурно-геофизические, петрологические, гидрогеохимические и минералого-геохимические методы (Нуждаев и др., 2024; Пальянова и др., 2024; Рычагов и др., 2022; Феофилактов и др., 2024; Фролова и др., 2020), назрела необходимость детального изучения геологического строения геотермальных аномалий и составления крупномасштабных карт. В 2022–2023 гг. на площади морфоструктуры, в пределах которой расположено Южно-Камбальное Дальнее термальное поле, нами проведены геологические маршруты с целью детального изучения горных пород, вмещающих термальное поле. Помимо лавового комплекса впервые для этого района были закартированы полнокристаллические породы, предварительно идентифицированные в полевых условиях как габбро и (или) габбро-долериты. Обнаружение интрузивных пород существенно актуализировало задачу исследования и послужило дополнительным стимулом для написания данной статьи.



ХАРАКТЕРИСТИКА
ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящей работы является детальная характеристика морфоструктуры и горных пород, вмещающих Южно-Камбальное Дальнее термальное поле, и построение крупномасштабной геологической схематической карты этого геотермального проявления. Основное внимание уделено интрузивным фациям, поскольку они обычно определяют структуру термальных полей, влияют на состав вулканических (геотермальных) газов и водных растворов, и во многих случаях служат источником рудных химических элементов, рассеянных во вмещающих горных породах и создающих аномалии в природных водах.

Вдоль осевой зоны вулканического хребта Камбальный на протяжении более 10 км разгружаются парогазовые струи и водные источники, объединенные в три группы термальных полей — Северную, Центральную и Южную (Белоусов и др., 1976; Нехорошев, 1959; Структура..., 1993). Южная группа привлекает особое внимание исследователей различных специальностей в связи с повышенной тепловой мощностью (Белоусов и др., 1976), разгрузкой на дневной поверхности глубинного щелочного геотермального

Рис. 1. Схематическая геологическая карта Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района ((Белоусов, 1978), с редакционными 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 — ниже-среднеплейстоценовые вулканы базальтового и андезибазальтового составов; 14 — нижеплейстоценовые лавы и туфы базальтов и андезибазальтов; 15–16 — верхнеплиоцен-средне- и нижеплейстоценовые отложения: 15 — вулканогенно-осадочные породы паужетской свиты, 16 — лавы и туфы древних вулканов; 17–21 — верхнемiocен-нижеплиоценовые осадочно-вулканогенные отложения: 17 — конгломераты и песчаники, реже туфы и лавы базальтов, 18 — туфы и лавы базальтов, туфоконгломераты, 19 — туфобрекчии и туфоконгломераты, 20 — грубообломочные туфы и лавы базальтов, 21 — песчаники и конгломераты, реже — туфы; 22 — миоценовые, преимущественно, вулканогенные нерасчлененные отложения; 23 — верхнемiocен-плиоценовые субвулканические интрузии диоритов и диоритовых порфиритов; 24 — рыхлые отложения различного генезиса и возраста; 25–27 — вулканические морфоструктуры: 25 — конусы вулканов (а — простые, б — с вершинным кратером), 26 — шлаковые конусы, мелкие моногенные вулканы и экструзии, 27 — кальдеры и остатки бортов кальдер; 28 — литологические границы; 29 — разрывные тектонические нарушения; 30 — 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. A schematic geological map of the Pauzhetka—Kambalnyi—Koshelev geothermal (ore) area ((Belousov, 1978) with modifications). 1–3 — Holocene deposits: 1 — alluvial, proluvial, and glacial, 2 — pyroclastic pumice deposits, 3 — basalts and basaltic andesites of active volcanoes and individual lava flows; 4–6 — Upper Pleistocene to Holocene deposits: 4 — dacite and rhyolite extrusive domes and their lava flows, 5 — andesites of Vostochno-Koshelev Volcano, 6 — basaltic andesites of Vostochno-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 Zapadno-Koshelev Volcano, 10 — basalts of older Koshelev Volcano, 11 — basaltic andesites of Kambalnyi Mountain Range, 12 — ignimbrites and baked tuffs of rhyodacites and rhyolites in the Golygin 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 to Middle to Lower Pleistocene deposits: 15 — volcanogenic-sedimentary rocks of the Pauzhetka suite, 16 — lavas and tuffs of older volcanoes; 17–21 — Upper Miocene to Lower Pliocene sedimentary-volcanogenic deposits: 17 — conglomerates and sandstones, less frequently tuffs and basalt lavas, 18 — basalt tuffs and lavas, tuff conglomerates, 19 — tuff breccias and tuff conglomerates, 20 — rudaceous tuffs and lavas of basalts, 21 — sandstones and conglomerates, less frequently tuffs; 22 — Miocene, dominantly volcanogenic unstratified deposits; 23 — Upper Miocene to Pliocene subvolcanic intrusions of diorites and diorite porphyrites; 24 — unconsolidated deposits of various genesis and age; 25–27 — volcanic morphostructures: 25 — volcanic cones (a — simple, b — with a summit crater), 26 — cinder cones, small monogenic volcanoes and extrusions, 27 — caldera and remains of caldera walls; 28 — lithologic boundaries; 29 — tectonic discontinuities; 30 — major thermal occurrences (1 — Pervye Goryachie Springs; 2 — Pauzhetka geothermal field; 3–5 — groups of thermal fields at the Kambalnyi Range: 3 — Severo-Kambalnyi, 4 — Tsentralno-Kambalnyi, 5 — Yuzhno-Kambalnyi; 6–7 — thermal anomalies in the Koshelev volcanic massif: 6 — Verkhne-Koshelev, 7 — Nizhne-Koshelev; 8 — Sivuchinsk thermal springs).

флюида (Структура..., 1993; Rychagov et al., 2025), образованием редкометальной минерализации в аргиллизированных породах (Пальянова и др., 2024; Рычагов и др., 2021), локализации термальных полей в совершенно различных геологических структурах (Феофилактов и др., 2024).

Южная группа геотермальных аномалий Камбального хребта объединяет три термальных поля: Дальнее, Центральное и Ближнее. Среди них выделяется Южно-Камбальное Дальнее термальное поле (ЮКД), локализованное в 7–8 км от вершины вулкана Камбальный. Примечательно, что данный вулкан, находившийся в состоянии покоя около 600 лет (Ropomageva et al., 2006), активизировался в марте–апреле 2017 г., что зафиксировано в ряде исследований (Гирина и др., 2017; Рычагов и др., 2017; Фирстов, Лобачева, 2018). Хотя особенности разгрузки термальных вод и парогазовых струй в пределах ЮКД уже описаны и увязаны с линейной зоной разрывных тектонических нарушений и сопутствующими трещинами (Феофилактов и др., 2024), детальный анализ геологического строения ЮКД остается нереализованной задачей.

Наиболее крупномасштабная геологическая съемка района Камбального хребта проведена в начале 1980-х гг. Согласно данным государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (Государственная..., 1984), все группы термальных полей, включая Южную, находятся в поле развития плейстоценовых пород смешанного состава (от дацитов до базальтов). Результаты последующих научных исследований позволили уточнить геологическую структуру, время формирования и распространение определенных типов пород (Фролова и др., 2020; Рычагов и др., 2021; Рычагов и др., 2024). Дальнее и Центральное термальные поля южной группы приурочены к базальтам и андезибазальтам вулкана Термальный, предположительно имеющим среднеплейстоценовый возраст (рис. 1), Ближнее — к породам смешанного состава (от андезибазальтов до дацитов), вероятно, более молодого возраста — вплоть до голоцена (Белоусов, 1978; Долгоживущий..., 1980; Леонов, 1989). При этом, согласно имеющимся данным (Сывороткин, 1993), к голоценовым постройкам Камбального хребта с достаточной степенью определенности можно отнести лишь современный стратовулкан Камбальный.

Морфоструктура, вмещающая ЮКД, имеет овальную форму и представляет собой U-образную эрозионную котловину, расширяющуюся на север (рис. 2). Основные температурные аномалии и пульсирующие водные источники трассируют ложе ручья Дальний в центральной части морфоструктуры, а также образуют участки, ограниченные тек-

тоническими нарушениями и приуроченные к контактам субвулканического тела. Область интенсивного прогрева пород имеет достаточно четкие границы (тектонические или, возможно, метасоматические) и представляет собой крупное изометричное в плане поле нерасчлененных вторичных кварцитов, опалитов и гидротермальных глин (рис. 2).

В работе (Фролова и др., 2020) рассмотрено изменение исходных андезибазальтов ЮКД во вторичные кварциты, опалиты и гидротермальные глины. Наши данные дополняют эти исследования. Андезибазальты обладают порфировой структурой, очень плотные, низкопористые, отличаются высокими значениями магнитной восприимчивости. Ближе к участкам прогрева андезибазальты осветлены за счет появления пор и увеличения количества микротрещин, выполненных смектитами и минералами кремнезема, в небольших количествах появляются каолинит, анатаз и гипс. Это свидетельствует о воздействии на породы процессов углекислотного выщелачивания. Сернокислотное выщелачивание проявлено непосредственно вблизи термальных источников и на интенсивно прогретых серных буграх. На широкой площади вокруг температурной аномалии образуются вторичные кварциты или монокварциты, состоящие преимущественно из минералов кремнезема. Серные опалиты, по-видимому, являются более современными образованиями, поскольку тяготеют к парогазовым струям; в составе опалитов преобладают аморфный кремнезем и сера, присутствуют каолинит, гипс, кварц, пирит, анатаз. В приповерхностном горизонте горячих участков термального поля исходные андезибазальты и обломочные склоновые отложения смешанного генезиса (делювиальные, коллювиальные и аллювиальные) трансформируются в гидротермальные глины (Фролова и др., 2020). Верхний горизонт толщи аргиллизитов (до 80 см разреза) представлен пористыми непрочными глинами сернокислотного выщелачивания (преобладает каолинит, дисперсные опал и кварц, присутствует смектит). Ниже залегают твердые плотные относительно однородные глины углекислотного выщелачивания, сложенные, в основном, иллитом; присутствуют тонкодисперсный кварц, опал, каолинит, алуит, гетит; содержание пирита достигает 8–11 %.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В геологических маршрутах в летний полевой период 2022 и 2023 гг. проведено описание всех выходов коренных горных пород, залегающих в пределах морфоструктуры ЮКД. Определены элементы залегания вулканических

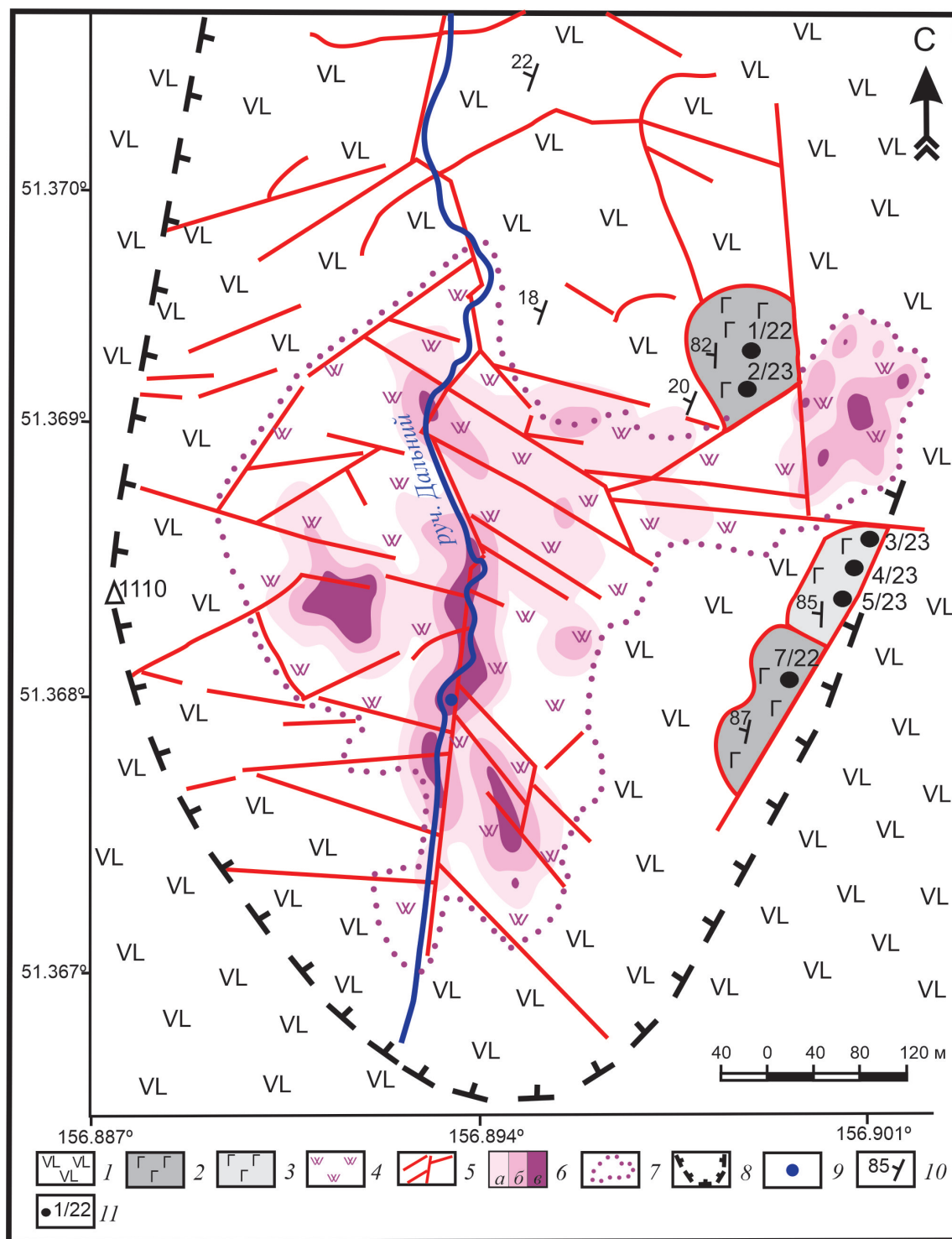


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Южно-Камбалного Дальнего термального поля. 1 — базальты и андезибазальты, 2 — габбро, 3 — долерит, 4 — вторичные кварциты, опалиты и аргиллизиты; 5 — разрывные тектонические нарушения, выделенные на основе дешифрирования ортофотоплана и подтвержденные при геологическом картировании; 6 — прогретые участки грунтов с интервалами температур (°C), а — 20–50, б — 50–80, в — более 80; 7 — границы поля гидротермально измененных пород; 8 — границы морфоструктуры ЮКД; 9 — центральный газо-водный пульсирующий котел, 10 — элементы залегания пород; 11 — точки отбора проб.

Fig. 2. Schematic geological map of the Southern Kamalnyi Dalniy thermal field. 1 — basalts and andezibazalts, 2 — gabbro, 3 — dolerite, 4 — quartzites, opalits and argillizits; 5 — the fractures allocated on the basis of decryption of the orthophotomap and confirmed at geological mapping; 6 — heated-up sites of soil with intervals of temperatures (°C), а — 20–50, б — 50–80, в — more than 80; 7 — the borders of hydrothermal rocks; 8 — the thermal field morfostruktura borders; 9 — the central gas-water pulsing copper, 10 — elements of rocks bedding; 11 — sampling points.

и предположительно интрузивных пород. Отобрано 25 образцов исходных пород (без видимых следов гидротермально-метасоматического изменения), из которых изготовлены прозрачные и полированные шлифы (аншлифы) и подготовлены пробы для определения химического состава. С целью создания геологической схематической карты выполнено дешифрирование ортофото-плана, построенного И.А. Нуждаевым, основа этой карты опубликована в работе (Рычагов и др., 2024).

Проведено петрографическое описание и фотодокументация шлифов с помощью поляризационного микроскопа «ПОЛАМ Л-213М» и цифровой фотокамеры «Canon EOS 1100D». Аншлифы использовались для определения состава и структуры отдельных минералов на микронзонде «Camebax-246» (Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, оператор С.В. Москалева). Общий химический состав пород определен методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре «S4 PIONEER» в Лаборатории рентгеновских методов анализа Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (пробы 2022 г.) и в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН (пробы 2023 г.). Необходимо отметить высокую сходимость результатов химического анализа двух лабораторий.

С целью пересчета и систематизации аналитических данных и построения классификационных диаграмм использовалась компьютерная программа PetroExplorer (Кориневский, 2015).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

В бортах морфоструктуры ЮКД залегают пологопадающие (от 15 до 28°) потоки базальтов и, преимущественно, андезибазальтов. Массивные разности чередуются с агломератовыми лавами.

Базальты и андезибазальты темно-серого цвета, обладают массивной текстурой, порфировой и микропорфировой структурой. Вкрапленники составляют 20–55 % объема породы и представлены, в основном, плагиоклазом №№ 32–60 (от андезина до лабрадора). Таблитчатые фенокристаллы часто образуют крестообразные сростки. У зональных кристаллов центральная часть резорбирована и выполнена стеклом. Клинопироксены представлены авгитом. Вероятно, первоначально присутствовал ромбический пироксен (гиперстен), который полностью замещен смектитом и хлоритами. Основная масса вулканитов состоит из микролитов плагиоклаза, мелких ксеноморфных зерен пироксена, вулканического стекла и тонкой вкрапленности оксидов железа и титана, а также

сульфидов (в основном, пирита). По трещинам в основной массе и по кристаллам плагиоклаза и пироксенов развивается лимонит.

В северо-восточной части морфоструктуры ЮКД выделено два интрузивных тела (рис. 2), по-видимому, субвулканической фации. Первое тело имеет изометричную в плане и штокообразную в вертикальном разрезе форму (угол падения — 84–93°), поперечный размер на уровне эрозионного среза составляет 100 м. Контакты с вмещающими андезибазальтами тектонические. Интрузивное тело сложено габбро. Темно-серые массивные средне- и крупнокристаллические породы с гипидиоморфнозернистой структурой имеют следующий минеральный состав: плагиоклаз — 50–60 %, клинопироксен — 30–40 %, оливин — 3 %, рудные минералы — 3 % (рис. 3а). Калиевый полевой шпат, кварц и вторичные минералы в сумме составляют до 3 %. Плагиоклаз, от лабрадора (№ 53) до анортита (№ 94), образует идиоморфные кристаллы таблитчатой и призматической формы, часто с полисинтетическими двойниками, в меньшей степени зональные. Клинопироксен представлен кристаллами авгита и пижонита. Авгит призматический с двойниками по 001 и ясной спайностью по 110, слабо плеохроирует в бурых тонах. По трещинам спайности происходит замещение авгита гидроокислами Fe и Mn (рис. 3б). Некоторые кристаллы полностью замещаются желтовато-бурым пластинчатым хлорит-смектитом в ассоциации с ангидритом и кварцем (рис. 3в). Зернистые агрегаты ангидрита выполняют трещинки в породе, кристаллы толстопризматического габитуса с характерной спайностью, пересекающейся под прямым углом, выполняют пространство между трещинами спайности в авгите и плагиоклазе (рис. 3г). Пижонит имеет буроватый оттенок, слабо плеохроирует в буровато-розовых тонах, спайность ясная по 001, хорошая отдельность параллельно 100; минерал не затронут вторичными изменениями. Оливин характерной ромбической формы полностью замещен хлорит-смектитом, кварцем и гидроокислами Fe и Mn. В породе присутствуют единичные кристаллы калиевого полевого шпата. Из аксессуарных минералов развивается апатит, из рудных — титаномagnetит, сфалерит, халькопирит, пирит. Таким образом, габбро затронут вторичными изменениями, в том числе, вероятно, современными гидротермальными.

Второе интрузивное тело имеет вытянутую форму и локализовано вдоль тектонического нарушения северо-восточного простирания (рис. 1). Контакты тела также крутопадающие. Центральная часть представлена крупно- и среднезернистыми габбро, приконтактовая сложена полнокристаллическими породами близкими

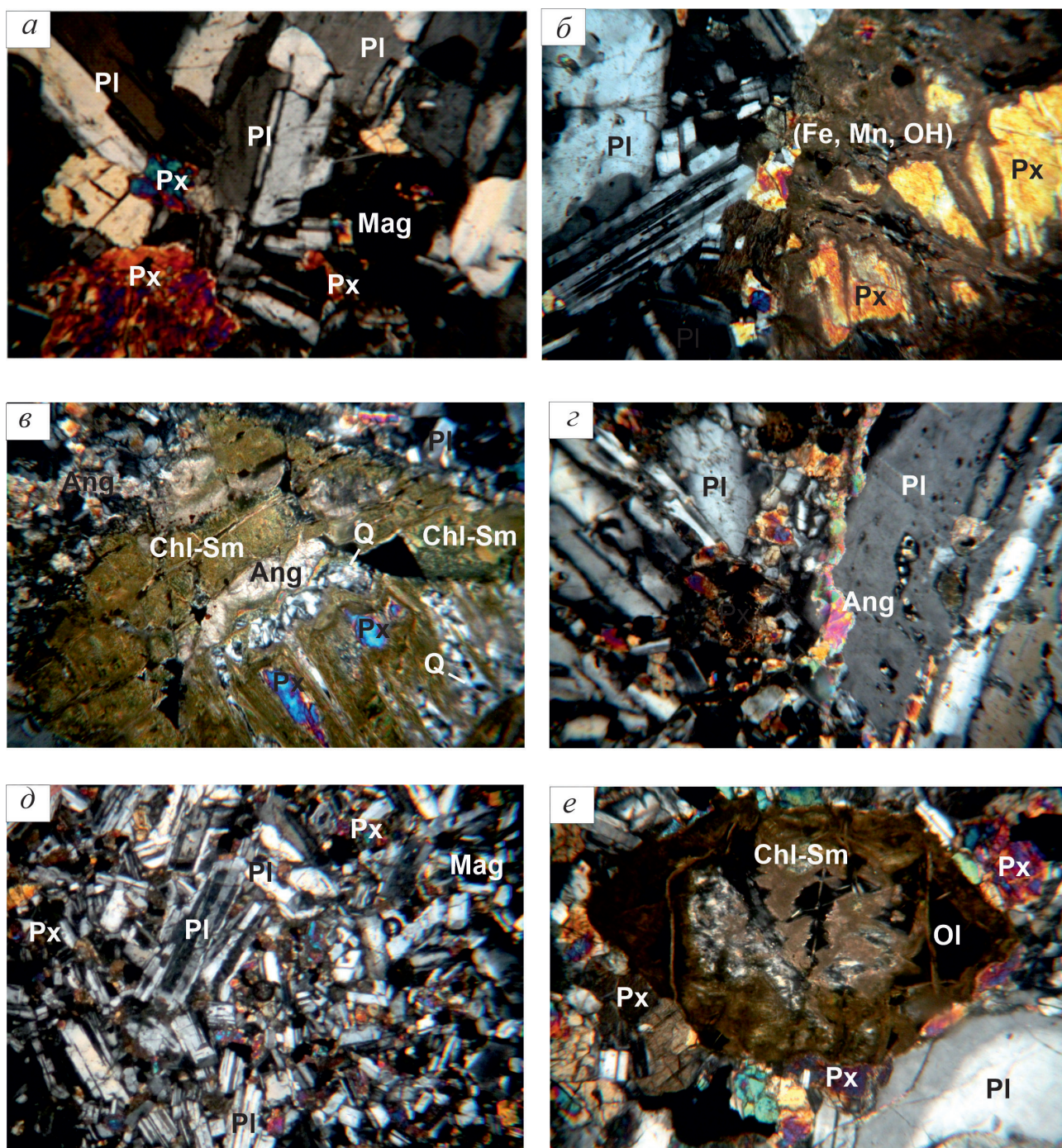


Рис. 3. Петрографические особенности габбро и долерита (фото с включенным анализатором, увеличение $\times 100$, поле зрения микроскопа 1.5 мм., шкала крупности зерен: крупные — более 2.5 мм, средние — от 1 до 2.5 мм, мелкие — менее 1 мм). *a* — гипидиоморфнозернистая структура габбро; *б* — замещение пироксена хлорит-сметитом и гидроокислами Fe и Mn; *в* — хлорит-сметит в ассоциации с ангидритом и кварцем; *г* — развитие ангидрита по трещинкам породы; *д* — долеритовая структура породы; *е* — зерно оливина с реакционной каймой из пироксена, замещенное хлорит-сметитом и кварцем. Pl — плагиоклаз, Px — пироксен, Ol — оливин, Q — кварц, Mg — магнетит, Chl-Sme — хлорит-сметит, Ang — ангидрит, (Fe, Mn, OH) — гидроокислы железа и марганца.

Fig. 3. Petrographic features of gabbro and dolerite (photo with the switched-on analyzer, increase $\times 100$ field of view of the microscope 1.5 mm, grain size scale: large over 2.5 mm, medium — from 1 to 2.5 mm, small — it's less than 1 mm). *a* — gipidiomorfnozernisty structure of a gabbro; *б* — pyroxene replacement chlorite-smectite and Fe and Mn hydroxides; *в* — chlorite-smectite in association with anhydrite and quartz; *г* — development of anhydrite in rock cracks; *д* — doleritovy structure of rock; *е* — the olivine grain with a reactionary border from pyroxene replaced chlorite-smectite and quartz. Pl — plagioclase, Px — pyroxene, Ol — olivine, Q — quartz, Mg — magnetite, Chl-Sme — chlorite-smectite, Ang — anhydrite, (Fe, Mn, OH) — hydrooxides of iron and manganese.

по составу и структуре к долериту (рис. 3д). Порфиновые вкрапленники представлены, в основном, зональным и незональным широко-таблитчатым битовнитом № 70–89. Клинопироксен (авгит) образует ксеноморфные кристаллы, минерал плеохроитрует в желтых и бежевых тонах с углом погасания 41°. Август часто замещается железистым хлорит-сметитом и ангидритом, в трещинках наблюдается скопление красновато-коричневых зерен илдингита. Агрегаты зерен ангидрита также выполняют микротрещины, но уже в основной массе породы.

Отмечается оливин ромбической формы с характерной реакционной каймой обрастания клинопироксеном. Оливин замещается хлорит-сметитом, кварцем и гидроокислами железа (рис. 3е). Рудные минералы представлены титаномагнетитом и ильменитом.

Породы обоих интрузивных тел имеют близкий химический состав (табл. 1), на TAS-диаграмме попадают в поле габбро (рис. 4). Они высокоглиноземистые $al' = 1.09–1.24$, нормально щелочные (калиево-натриевого типа) ($K_2O + Na_2O = 2.94–3.97$), умеренно титанистые ($TiO_2 = 0.80–0.97\%$), с невысоким содержанием MgO ($3.68–5.26$) и принадлежат к толеитовой низко-калиевой петрохимической серии (рис. 5а). Аналогами изучаемых габбро и долеритов являются толеитовые ферробазальты (рис. 5б) (Arculus, 2003).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГАББРО И ДОЛЕРИТОВ

Плаггиоклаз является основным породообразующим минералом в габбро и долерите и имеет

Таблица 1. Химический состав габбро и долерита ЮКД (мас. %)

Table 1. Chemical composition of gabbro and dolerite of YuKD (wt. %)

Порода	Габбро			Долерит		
№ пробы/год	1/22	2/23	7/22	3/23	4/23	5/23
SiO ₂	49.25	45.71	49.45	47.86	49.41	47.91
TiO ₂	0.89	0.92	0.80	0.97	0.92	0.92
Al ₂ O ₃	18.51	20.28	17.78	19.01	18.23	18.50
Fe ₂ O ₃	11.66	8.06	10.59	8.33	8.65	8.15
FeO	н/о	4.50	н/о	3.81	8.65	3.83
MnO	0.29	0.24	0.27	0.21	0.26	0.22
MgO	5.26	3.68	4.94	4.31	4.89	4.51
CaO	8.75	11.58	9.74	10.07	3.06	10.54
Na ₂ O	2.42	2.87	2.27	2.97	2.85	2.97
K ₂ O	0.52	0.84	0.71	0.86	0.91	1.00
P ₂ O ₅	0.21	0.17	0.15	0.18	0.21	0.19
S	0.05	0.01	0.00	0.13	0.16	0.22
П.п.п.	1.54	1.08	1.49	1.28	1.00	1.03
Сумма	99.44	100	98.26	100	99.21	99.98
Na ₂ O+K ₂ O	2.94	3.71	2.98	3.83	3.76	3.97
al'	0.67	1.25	0.71	1.15	0.82	1.12
f	2.02	1.22	1.94	0.88	1.77	0.85

Примечание. Определения выполнены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова (ИГХ) СО РАН (пробы 2022 г.) и в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН (пробы 2023 г.) на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer. н/о — не определено. FeO рассчитан исходя из Fe₂O₃ (Fe₂O₃/1.1), мас. %. $al' = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$, мас. % — коэффициент глиноземистости. $f = FeO / MgO$, мас. % — коэффициент железистости.

Note. The analyses were performed at the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IGC SB RAS) (tests of 2022) and in the Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IVS FEB RAS) (tests of 2023) using S4 Pioneer XRF spectrometer. н/о — not available. FeO is calculated based on Fe₂O₃ (Fe₂O₃/1.1), wt. %. $al' = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO + MgO)$, wt. % — alumina ratio. $f = FeO / MgO$, wt. % — iron ratio.

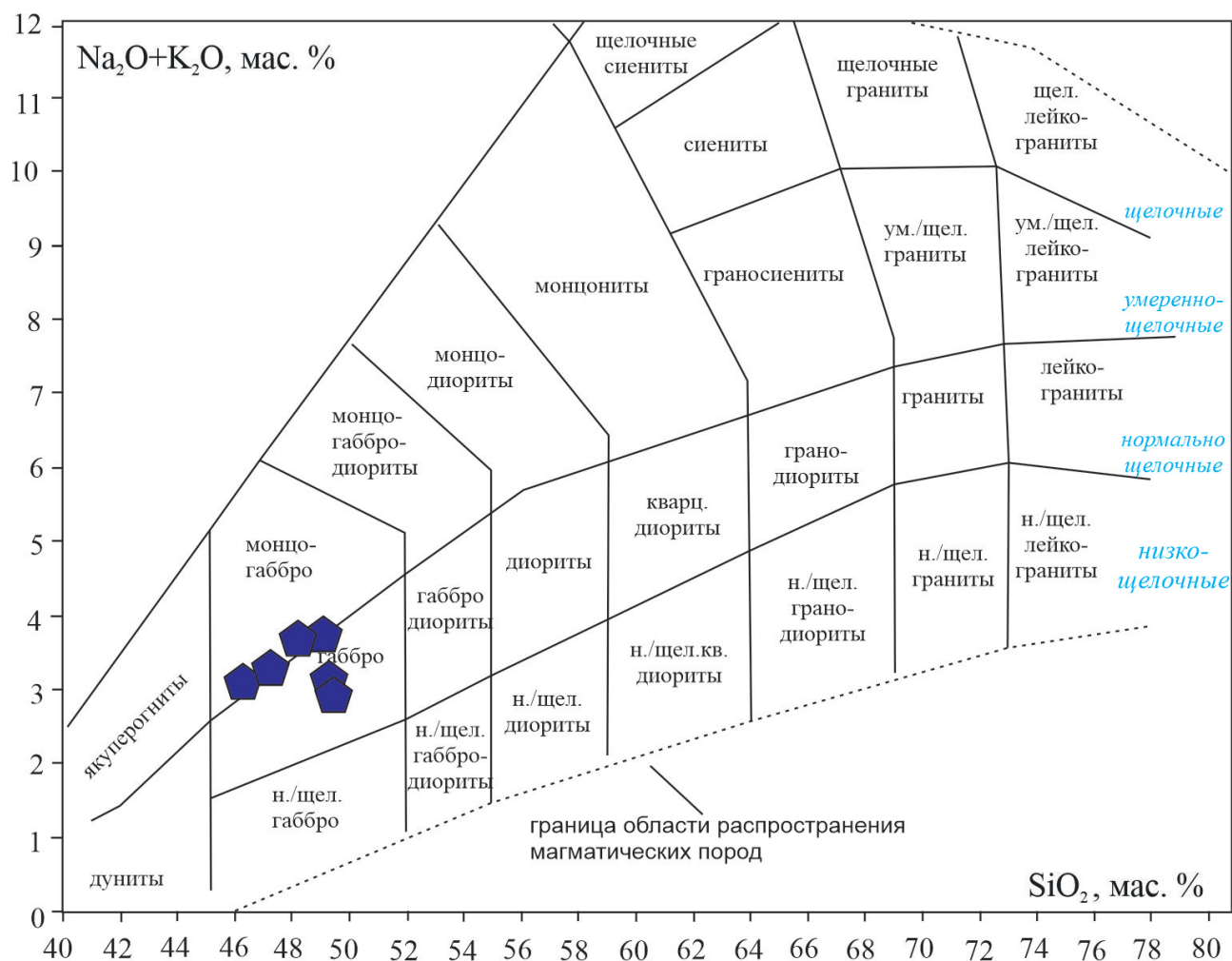


Рис. 4. TAS-диаграмма габбро и долерита.

Fig. 4. TAS is the chart of a gabbro and dolerite.

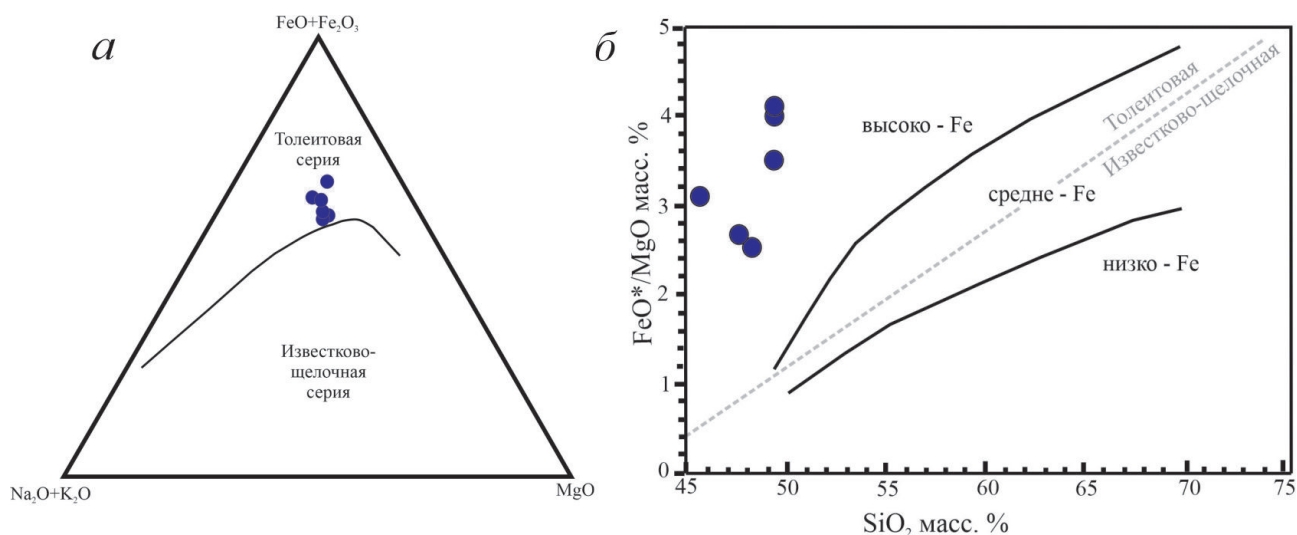


Рис. 5. Габбро и долериты на классификационных схемах: *а* — AFM-диаграмма, *б* — диаграмма соотношения FeO^*/MgO и SiO_2 (FeO^* — общее содержание железа FeO), согласно работе (Arculus, 2003).

Fig. 5. Gabbro and dolerites on classification schemes: *a* — AFM-diagram, *б* — FeO^*/MgO vs SiO_2 diagram (FeO^* is total Fe as FeO), according to article (Arculus, 2003).

следующий химический состав (табл. 2). Плаггиоклазы габбро соответствуют лабрадору An_{50-54} , в единичных случаях битовниту An_{71-88} и анортиту An_{90-94} . В долерите преобладает низкокальцевый лабрадор An_{63-69} , в редких случаях битовнит An_{89} , санидин и анортотоклаз (рис. 6а).

Клинопироксен в габбро соответствует кальциевому авгиту состава Wo_{34-35} , En_{39-47} , Fs_{19-26} и магнезиально-железистому пижониту состава Wo_{10-14} , En_{39-56} , Fs_{35-55} . В долеритах он соответствует авгиту состава Wo_{33-35} , En_{39-46} , Fs_{20-27} и пижониту Wo_8 , En_{54} , Fs_{37-39} (рис. 6б).

Отношение $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ в габбро колеблется в пределах 0.41–0.71 (авгит 0.41–0.55, пижонит 0.58–0.71), в долеритах 0.45–0.55 (авгит 0.45–0.55, пижонит 0.53–0.54). Таким образом, железистость в авгитах и пижонитах увеличивается от долеритов к габбро (табл. 3).

Наличие в породах пижонита свидетельствует о формировании тонких структур распада твердого раствора, которые трудно диагностировать при исследовании шлифов. Эти структуры свидетельствуют о медленном остывании расплавов: поскольку растворимость кальция в

пижоните при понижении температуры падает, пижонит из медленно остывающих интрузий неизменно содержит выделившиеся пластинки богатой кальцием авгитовой фазы (Патнис, Мак-Коннелл, 1983).

В результате микрозондовых исследований в долерите был обнаружен неизменный оливин и определен его состав. Для описания состава оливина используют содержание форстеритового ($Fo = 100 \cdot Mg/(Mg + Fe^{2+})$, мол. %) или фаялитового минала ($Fa = 100 \cdot Fe^{2+}/(Mg + Fe^{2+})$, мол. %) (табл. 4). Содержание фаялитового минала (Fe_2SiO_4) в оливине колеблется от 45 до 49 мол. %, что соответствует составу гортоналита (рис. 6в). Считается, что более железистый оливин является продуктом фракционировавшей базальтовой магмы (Herzberg et al., 2013).

При изменении физико-динамических условий положение оливина теряет устойчивость и вступает в реакцию с расплавом, что приводит к кристаллизации магнетита. Образующиеся кристаллы магнетита преимущественно локализируются: по трещинам в кристаллах оливина; на их периферии — в виде округлых зерен

Таблица 2. Химический состав плаггиоклаза по данным микрозондовых исследований (мас. %)

Table 2. Chemical composition of a plagioclase according to microprobe researches (wt. %)

№ анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	54.50	27.11	1.28	10.34	5.40	0.00	98.63
2	55.92	26.65	1.28	9.84	4.98	0.42	99.09
3	45.67	34.79	0.70	18.16	0.88	0.00	100.21
4	52.59	30.65	1.07	13.67	3.39	0.00	101.37
5	46.06	34.09	0.75	17.96	1.14	0.00	100.01
6	55.17	28.14	0.93	11.29	4.89	0.33	100.74
7	45.97	33.64	1.25	17.55	1.12	0.00	99.53
8	51.27	31.11	1.06	13.87	3.08	0.00	100.39
9	44.66	35.17	0.00	19.00	0.63	0.00	99.45
10	54.91	28.03	1.85	10.55	4.88	0.40	100.63
11	52.69	29.59	1.11	12.79	4.17	0.33	100.69
12	50.90	31.41	1.25	13.88	3.44	0.00	100.89
13	53.57	29.20	1.00	12.37	4.05	0.31	100.51
14	52.28	29.91	1.37	12.87	3.85	0.34	100.62
15	51.55	30.27	1.01	13.67	3.58	0.00	100.09
16	58.78	25.87	0.93	8.46	6.39	0.48	100.89
17	56.11	27.31	1.08	10.44	4.96	0.36	100.27
18	46.15	33.98	0.78	17.79	1.19	0.00	99.89
19	49.89	32.01	1.01	0.00	2.17	16.03	101.11
20	65.71	20.22	0.56	2.24	7.13	4.24	100.67

Примечание. 1–10 — образец 2/23 отобранный из габбро Южно-Камбального Дальнего термального поля (ЮКД); 11–20 — образец 4/23 отобранный из долеритов ЮКД.

Note. 1–10 — sample 2/23 collected from the gabbro of the Southern Kambalny Dalniy thermal field (YKD), 11–20 — sample 4/23 collected from the dolerite of YKD.

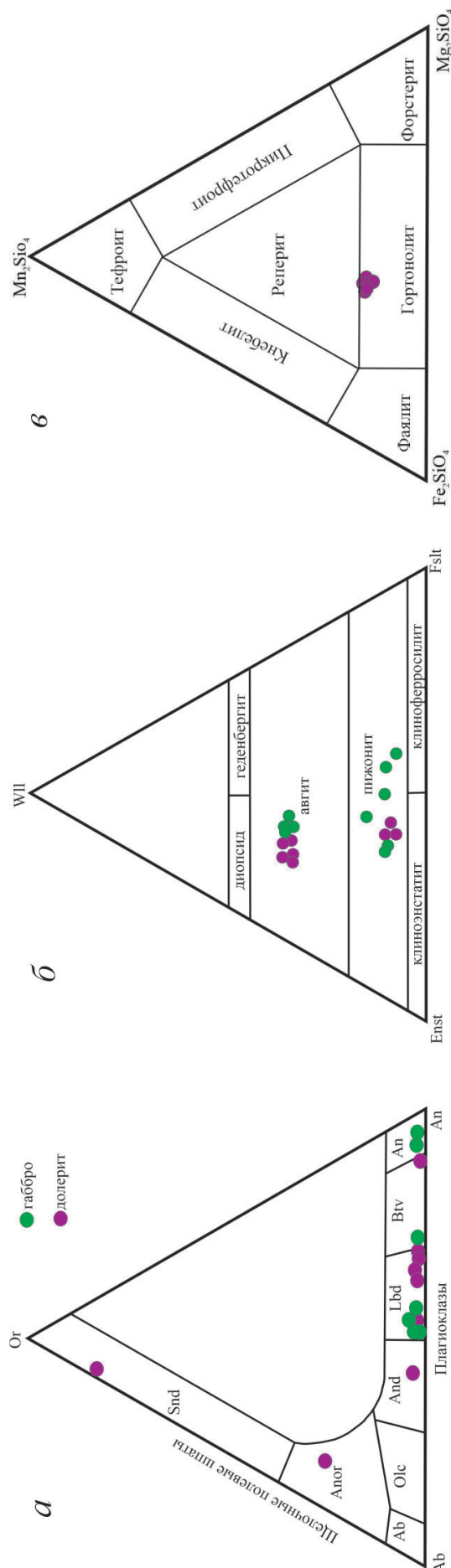


Рис. 6. Состав породообразующих минералов: а — плагиоклазов и щелочных полевых шпатов, б — пироксенов, в — оливинов.
Fig. 6. Composition of rock-forming minerals: а — plagioclases and alkaline feldspars, б — pyroxenes, в — olivines.

с нерегулярным распределением. Процесс синхронного образования магнетита за счет трансформации оливина типичен для апикальных зон интрузивных магматических тел (Юрьев, 1969).

Среди сульфатов в габбро диагностируется барит ($\text{BaO} = 55.4\text{--}59.78$; $\text{SO}_3 = 34.37\text{--}35.39$; $\text{SrO} = 4.10\text{--}4.39$; $\text{FeO} = 1.39\text{--}1.73$ мас. %) являясь вторичным минералом, он образует ксеноморфные зерна (рис. 7а). Так же диагностирован ангидрит ($\text{SO}_3 = 49.07\text{--}61.91$; $\text{CaO} = 39.18\text{--}40.70$; $\text{FeO} = 0.00\text{--}0.81$ мас. %) (рис. 7б).

Основными рудными минералами в габбро и долерите ЮКД являются титаномagnetит и ильменит. Минералы образуют сложные взаимопрорастающие структуры. Титаномagnetит образует тонкие сростания с ильменитом (рис. 7в). Характерной особенностью является развитие ильменита в виде решетчатой структуры по титаномagnetиту, которая образуется в результате распада твердого раствора «магнетит-ильменит» (рис. 7д).

Сульфиды присутствуют в виде рассеянной вкрапленности в основной массе пород, размер зерен варьирует от первых десятков до 300 мкм. Определены пирит, халькопирит и сфалерит. Сфалерит часто развивается по халькопириту в виде мелкой сыпи, в краевых частях зерен образуется кобальт-никельсодержащий пирит (бравойт) (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в научных исследованиях геотермальных систем Камбального вулканического хребта выделены интрузивные породы субвулканической фации: габбро и долериты, образующие крутопадающие штокообразные тела с тектоническими границами. Прямое или опосредованное влияние этих пород на формирование структуры современного термального поля остается дискуссионным. По совокупности имеющихся данных оно представляется маловероятным. Вместе с тем они затронуты постмагматическими процессами: отмечается хлоритизация оливина и клинопироксена, калишпатизация плагиоклаза и др., а также образование сульфидов — халькопирита, сфалерита и Co-Ni-содержащего пирита за счет замещения первичных минеральных фаз. Вероятно, габбро и долериты могут служить источником рудных соединений, обнаруженных нами в аргиллизированных андезибазальтах Южно-Камбального Центрального термального поля, расположенного в непосредственной близости от ЮКД (Rychagov et al., 2025).

Также впервые составлена схематическая геологическая карта крупного масштаба (~ 1:2 000) одного из геотермальных проявлений

Таблица 3. Химический состав пироксенов по данным микрозондовых исследований (мас. %)**Table 3.** Chemical composition of pyroxene according to microprobe researches (wt. %)

№ анализа	SiO ₂	TiO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1	52.32	0.00	1.52	14.80	0.00	14.33	17.0	100.03
2	51.78	0.54	1.46	16.57	0.00	13.66	17.05	101.05
3	51.81	0.53	10.6	16.06	0.54	13.08	16.26	100.08
4	52.39	0.00	1.20	22.62	0.68	16.03	6.86	99.77
5	53.10	0.00	0.87	21.12	0.74	20.34	4.89	101.06
6	51.93	0.00	0.87	26.96	0.91	15.42	4.80	100.89
7	53.07	0.00	1.19	21.18	0.66	20.18	4.71	100.99
8	51.68	0.00	0.00	30.00	0.92	13.13	4.59	100.32
9	53.42	0.00	0.74	21.66	0.75	19.93	4.48	100.99
10	51.33	0.00	0.00	32.38	0.90	12.82	3.24	100.66
11	51.81	0.65	2.08	12.77	0.45	15.22	17.07	100.06
12	52.19	0.63	2.53	11.59	0.38	16.42	17.03	100.77
13	52.68	0.46	1.59	13.75	0.41	15.15	16.61	100.67
14	52.55	0.59	2.13	11.74	0.40	16.71	16.75	100.88
15	53.30	0.44	0.81	21.46	0.87	19.51	4.52	100.91
16	52.56	0.35	1.71	22.17	0.67	19.08	4.21	100.21
17	52.23	0.38	0.00	23.76	0.68	18.39	4.21	99.64
18	53.22	0.00	0.56	22.94	0.64	19.67	4.06	101.10
19	52.27	0.58	1.90	13.80	0.47	15.10	16.56	100.67
20	52.34	0.55	2.17	11.67	0.57	16.44	16.69	100.44

Примечание. 1–10 — образец 2/23 отобранный из габбро ЮКД; 11–20 — образец 4/23 отобранный из долеритов ЮКД.

Note. 1–10 — sample 2/23 collected from gabbro of YKD, 11–20 — sample 4/23 collected from dolerite of YKD.

Таблица 4. Химический состав оливина по данным микрозондовых исследований**Table 4.** Chemical composition of olivine according to microprobe researches

Компоненты (мас. %) / № анализа	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	34.17	34.83	34.95	35.19	35.40	35.46
FeO	43.38	43.43	41.96	41.51	39.91	40.11
MnO	1.12	1.16	0.68	0.72	0.75	0.68
MgO	22.86	23.45	23.99	24.07	26.46	26.47
CaO	н/о	н/о	0.35	н/о	0.29	0.37
Сумма	101.54	102.87	101.93	101.49	102.82	103.09
Формульные коэффициенты (мол. %)						
Si	0.979	0.982	0.987	0.994	0.979	0.979
Fe ²⁺	1.039	1.024	0.991	0.981	0.923	0.926
Mn	0.027	0.028	0.016	0.017	0.018	0.016
Mg	0.976	0.985	1.010	1.014	1.091	1.089
Ca	-	-	0.011	-	0.009	0.011
Главные миналы (мол. %)						
Fa	48.44	49.03	49.53	49.17	45.83	45.96
Fo	51.56	50.97	50.47	50.83	54.17	54.04

Примечание. 1–3 — образец 4/23, 4–6 — образец 3/23, отобранный из долеритов ЮКД. Fa = $\text{Fe}^{2+} \cdot 100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, (мол. %). Fo = $100 \cdot \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, (мол. %). н/о — не определено.

Note. 1–3 — sample 4/23, 4–6 — sample 3/23 collected from dolerite of YKD. Fa = $\text{Fe}^{2+} \cdot 100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, (mol. %). Fo = $100 \cdot \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, (mol. %). н/о — not available.

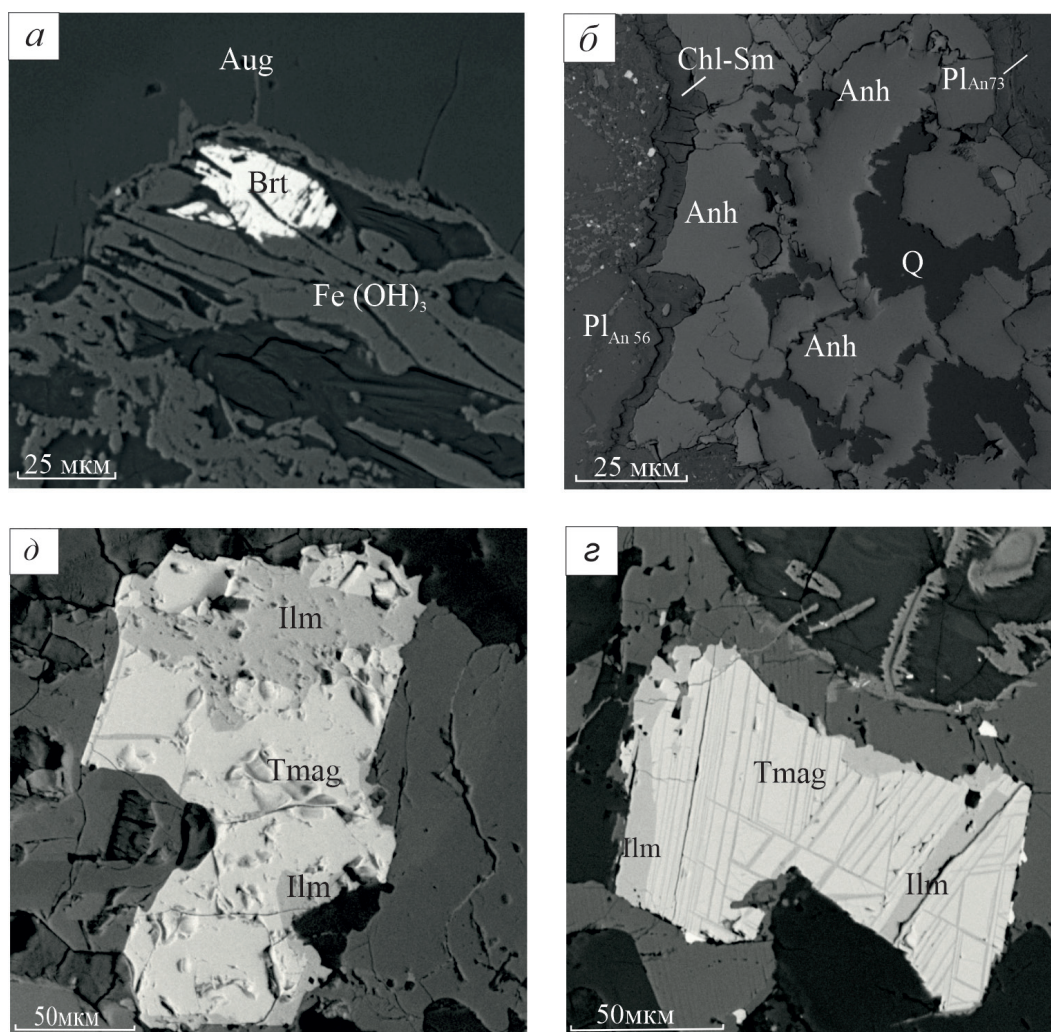


Рис. 7. Минеральные ассоциации габбро и долерита: *a* — замещение авгита (Aug) гидроокислами железа (Fe(OH)₃), хлорит-сметитом (Chl-Sm) с образованием ксеноморфных зерен барита (Brt); *б* — выполнение трещинок ангидритом (Anh) в габбро; *в* — тонкие сростания титаномагнетита (Tmag) с ильменитом (Ilm); *д* — развитие ильменита (Ilm) в виде решетчатой структуры по титаномагнетиту (Tmag).

Fig. 7. Mineral associations of gabbro and dolerite: *a* — replacement of augite (Aug) by iron hydroxides (Fe(OH)₃) and chlorite-smectite (Chl-Sm) with the formation of xenomorphic barite (Brt) grains; *б* — filling of cracks with anhydrite (Anh) in gabbro; *в* — thin intergrowths of titanomagnetite (Tmag) with ilmenite (Ilm); *д* — development of ilmenite (Ilm) in the form of a lattice structure over titanomagnetite (Tmag).

Таблица 5. Химический состав сульфидов по данным микрозондовых исследований (мас. %)

Table 5. Chemical composition of sulfides according microprobe researches (wt. %)

№ анализа	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Сумма
1	51.20	24.90	0.00	0.00	23.90	0.00	100.00
2	50.58	24.94	0.00	0.00	24.48	0.00	100.00
3	48.68	26.04	0.00	0.00	24.28	0.00	100.00
4	50.20	25.38	0.00	0.00	24.42	0.00	100.00
5	50.11	21.91	0.00	0.00	20.56	7.41	100.00
6	50.40	25.46	0.00	0.00	24.15	0.00	100.00
7	51.17	24.94	0.00	0.00	23.88	0.00	100.00
8	50.14	14.90	0.00	0.00	13.84	21.11	100.00
9	53.64	11.14	17.81	9.68	7.74	0.00	100.00
10	52.85	10.43	20.39	10.18	6.14	0.00	100.00

Примечание. 1–7 — халькопирит, 8 — сфалерит, 9–10 — Co-Ni-содержащий пирит.

Note. 1–7 — chalcopyrite, 8 — sphalerite, 9–10 — Co-Ni-containing pyrite.

Камбального вулканического хребта — Южно-Камбального Дальнего термального поля. Гидротермально измененные породы (вторичные кварциты, опалиты и аргиллизиты) развиты в пределах контура температурной аномалии и трассируют основную зону разрывных тектонических нарушений, контролируя восходящий тепловой поток. Это свидетельствует в пользу современного происхождения гидротермально измененных пород в результате прогресса вмещающих горных пород парогазовыми струями и разгрузки термальных вод по основному субмеридиональному тектоническому нарушению и системе оперяющих его трещин.

Вмещающими термальное поле горными породами являются андезибазальты: потоки массивных и агломератовых лав имеют пологое падение (в среднем, 18–20°) на северо-запад, что указывает на расположение центра вулканических извержений на юго-востоке за пределами современной морфоструктуры ЮКД. Андезибазальты, залегающие вне контура температурной аномалии, не подвержены гидротермально-метасоматическим изменениям.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам структурно-геофизического отряда ИВиС ДВО РАН И.А. Нуждаеву, С.О. Феофилактову, Ю.В. Фроловой, А.М. Самойлову, О.В. Кравченко, Т.В. Шевченко, А.Б. Ермолинскому за практическую помощь при проведении полевых исследований. Мы благодарны сотрудникам Аналитического Центра ИВиС ДВО РАН и лаборатории рентгеновских методов анализа ИГХ им. А.П. Виноградова СО РАН за большой объем прецизионных аналитических исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2025-0001, номер государственного регистрационного учета 125031703820-4.

Список литературы [References]

- Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 176 с. [*Belousov V.I.* Geology of geothermal fields in areas of modern volcanism. Moscow: Nauka, 1978. 176 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 Pauzhetsky hydrothermal system // Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka. Vladivostok: DVNC Academy of Sciences of the USSR publishing house, 1976. P. 23–57 (in Russian)].
- Гирин 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., Nuzhdayev A.A.* A volcanic eruption Kambalny in 2017 // Modern problems of remote sensing of Earth from space. 2017. T. 14. № 2. P. 263–67 (in Russian)].
- Государственная геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Западно-Камчатская серия / Ред. Н.Ф. Данилеско. Л.: ВСЕГЕИ, 1984 [State geological map of the USSR of scale 1:200 000. West Kamchatka series / Edition of N.F. Danilevskiy. Leningrad: VSEGEI, 1984 (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. Т. 30. № 5. С. 480–497. <https://doi.org/10.31857/S0869590322050028> [*Davydova V.O., Bindeman I.N., Shchekleina M.D., Rychagov S.N.* Pauzhetskaya caldera (Southern Kamchatka): exploring temporal evolution and origin of voluminous silicic magmatism // Petrology. 2022. V. 30. № 5. P. 462–478. <https://doi.org/10.1134/s0869591122050022>].
- Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с. [Long-living center of endogenous activity of the Southern Kamchatka. Moscow: Nauka, 1980. 172 p. (in Russian)].
- Кориневский Е.В.* PetroExplorer — система для создания геохимических информационно-аналитических массивов в процессе тематических исследований // Геоинформатика. 2015. № 4. С. 48–53. [*Korinevsky E.V.* PetroExplorer — a system for creation of geochemical information and analytical massifs in the course of case studies // Geoinformatics. 2015. № 4. P. 48–53 (in Russian)].
- Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 105 с. [*Leonov V.L.* Structural conditions of localization high-temperature hydroterm. Moscow: Nauka, 1989. 105 p. (in Russian)].
- Нехорошев А.С.* Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке // Бюллетень Вулканологических станций. М.: АН СССР, 1959. № 28. С. 23–32 [*Nekhoroshev A.S.* Hydrothermal activity of the area of Ridge Kambalny on the southern Kamchatka // Bulletin Volcanological stations. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1959. № 28. P. 23–32 (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.31857/S02003030622060049> [*Nuzhdayev I.A., Rychagov S.N., Feofilaktov S.O., Denisov D.K.* The magnetic field in the geothermal systems of the Pauzhetska area, Southern Kamchatka // Volcanology and seismology. 2023. V. 17. P. 102–118. <https://doi.org/10.1134/s0742046322060033>].
- Патнис А., Мак-Коннелл Дж.* Основные черты поведения минералов. М.: Мир, 1983. 304 с. [*A. Patnis,*

- J.D.C. Mc Connel*. Principles of minerals behavior. New York: Elsevier, 1980. 257 p.].
- Рычагов С.Н., Бойкова И.А., Нuzhдаев И.А., Феофилактов С.О.* Новые данные о геологическом строении Южно-Камбального Дальнего термального поля (Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 27–29 марта 2024 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 245–248 [*Rychagov S.N., Boikova I.A., Nuzhdaev I.A., Feofilaktov S.O.* New data on the geological structure of the South-Kambalny Dalniy Thermal Field (kamchatka) // Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVII annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day, March, 27–29, 2024. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2024. P. 245–248 (in Russian)].
- Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Сергеева А.В., Нuzhдаев 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., Sergeyeva A.V., Nuzhdayev I.A.* Composition of ashes of a volcano Kambalny (eruption of 2017) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2017. № 4 (36). 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.* The composition, structure, and origin of carbonate concretions of the Southern Kambalny Central thermal field, Kamchatka // Volcanology and seismology. 2021. V.15. P. 258–272. <https://doi.org/10.1134/S0742046321040059>].
- Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с. [Structure of a hydrothermal system. Moscow: Nauka, 1993. 298 p. (in Russian)].
- Стратегия развития топливно-энергетического потенциала Дальневосточного экономического региона до 2020 г. Владивосток: Дальнаука, 2001. 112 с. [The strategy of development for fuel and energy capacity of the Far East economic region till 2020. Vladivostok: Dalnauka, 2001. 112 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 projection // Study and use of geothermal resources in volcanic areas. Moscow: Nauka, 1979. P. 26–35 (in Russian)].
- Сывороткин В.Л.* Современный вулканизм Южной Камчатки и гидротермальный процесс // Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. С. 21–47 [*Syvorotkin V.L.* Modern volcanism of the Southern Kamchatka and hydrothermal process // Structure of a hydrothermal system. Moscow: Nauka, 1993. P. 21–47 (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-45-58> [*Firstov P.P., Lobacheva M.A.* The wave indignations in the atmosphere accompanying a volcanic eruption Kambalny (Kamchatka) in 2017 // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2018. № 2 (38). P. 45–58 (in Russian)].
- Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. и др.* Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. С. 36–51. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51> [*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 (Southern Kamchatka) // Engineering geology. 2020. T. XV. № 1. P. 36–51 (in Russian)].
- Юрьев Л.Д.* Мирмекитовые структуры магнетита в монзонитах Приазовья. Труды минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. 1969. Вып. 19. С. 242–247 [*Yuryev L.D.* Mirmekitovye structure of magnetite in montsonita of Priazovye. Works of the mineralogical museum of A.E. Fersman. 1969. Release 19. P. 242–247 (in Russian)].
- Arculus R.J.* Use and abuse of the terms calcalkaline and calcalkalic // Journal of Petrology. 2003. V. 44. № 5. P. 929–935. <https://doi.org/10.1093/petrology/44/5/929>
- Herzberg C., Asimow P.D., Ionov D. et al.* Nickel and helium evidence for melt above the core-mantle boundary // Nature. 2013. V. 493. Iss. 7432. P. 393–397.
- 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. P. 107392. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107392>
- Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V.* Sector collapses large landslides on Late Pleistocene-Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 158. № 1. <https://doi.org/10.1016/jvolgeores.2006.04.016>
- Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Sandimirova E.I. et al.* The Structure and Origin of the South Kambalny Central Thermal Field, Kamchatka // Journal of Volcanology and Seismology. 2025. V. 19. № 5. P. 411–434.

БОЙКОВА, РЫЧАГОВ

**GABBRO AND DOLERITE IN MORFOSTRUCTURE
OF THE SOUTHERN KAMBALNY DALNIY THERMAL FIELD
(KAMCHATKA)**

I.A. Boikova, S.N. Rychagov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;
e-mail: bira06@yandex.ru; rychn@kscnet.ru*

Received March 04, 2026; June 16, 2026; accepted June 27, 2026

For the first time in scientific studies of geothermal manifestations in the Kambal Volcanic Range, within the South-Kambal Far Thermal Field, subvolcanic-facies intrusive rocks (gabbro and dolerite) have been identified, forming steeply dipping, columnar bodies with tectonic boundaries. The composition and nature of secondary alterations in the gabbro and dolerite are examined. It is hypothesized that these rocks may serve as a source of ore material in modern hydrothermal-metasomatic processes. A schematic geological map of the South-Kambalny Dalny Thermal Field has been compiled. The host rocks of the thermal field are andesite basalts: flows of massive and agglomeratic lava dip gently (on average, 18–20°) to the northwest, indicating that the center of volcanic eruptions was located in the southeast, beyond the boundaries of the modern steam-hydrothermal discharge zone. It is shown that hydrothermally altered rocks are widespread within the boundary of the temperature anomaly and are of recent origin due to the discharge of geothermal steam and thermal waters along the main linear fault and the system of tectonic fractures flanking it.

Keywords: volcanic ridge, thermal fields, geological structure, gabbro, dolerite.