

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОМАЛИЙ ОТНОШЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАСОМАТИТОВ ВУЛКАНОВ О. ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА). ЧАСТЬ 1: ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ «ГЕНЕРАЛЬНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ»

© 2026 Т.В. Володькова

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия, 680000;
e-mail: tat-volodkova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 29.04.2025; после доработки 04.09.2026; принята в печать 25.09.2026

Значения надфоновых аномалий отношений естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), температуры и водородного показателя различных типов метасоматитов однозначно связаны уравнением метасоматоза. Сделано предположение, что на графике уравнения метасоматоза фигуративные точки этих характеристик приближенно образуют «генеральную последовательность». «Генеральная последовательность» определяет закономерную смену типа метасоматоза с ростом значений температуры и водородного показателя. Доказательство верности этого положения — основная задача работы. Экспериментальных данных для оценки всех типов метасоматитов недостаточно — слабо охарактеризованы пропилиты и полевошпатсодержащие комплексы. Разработана методика получения таких данных в системах вулканов и магматических комплексов о. Итуруп (Курильские о-ва), где особенно широко распространены метасоматиты классической пропилитовой ассоциации. При изучении гидротермально-метасоматических систем вулканов определены значения надфоновых аномалий отношений ЕРЭ, характерные для ареалов регионального инфильтрационного метасоматоза. Дополнительно использовались значения температур, редко водородного показателя. Это позволяет получить переопределенную систему уравнений и повышает достоверность решения. Рассчитаны статистические характеристики отдельных типов метасоматоза, уточняющие «генеральную последовательность».

Ключевые слова: аномалии отношений радиоактивных элементов, аэромагниторазведка, метасоматиты.

ВВЕДЕНИЕ

Выраженная региональная инфильтрационная гидротермально-метасоматическая зональность — важный поисковый признак рудных месторождений. Крупные месторождения формируются под воздействием корово-мантийных процессов, с непрямым участием мантийного метасоматоза (Володькова, 2020; Глубинный..., 2019; Мартынов, 2010; Метасоматизм..., 1998; Плющев и др., 2012). Теория метасоматической зональности в равновесных условиях, аналитические выражения для основных разновидностей метасоматоза с использованием формулы термодинамического потенциала впервые разработана Д.С. Коржинским (1969, 1973, 1993). Его ученики и последователи, в основном, экспериментально,

подтвердили верность построений Д.С. Коржинского и выделили метасоматические фации с соответствующими наборами параметров температуры, давления, водородного показателя pH (Зарайский, 2007; Метасоматизм..., 1998). Классическая таблица метасоматических фаций (типов) составлена Е.В. Плющевым с соавторами (1985, 2012).

В дальнейшем при попытках дистанционного картирования региональных метасоматитов развитие получили гиперспектральные съемки (Кац, Рябухин, 1984; Кирсанов и др., 2019, 2022; Мотов и др., 2014), а также их модификация — метод ASTER (Yamaguchi et al., 1998). Эти методы в лучшем случае позволяют дистанционно зафиксировать ареал метасоматоза, что особенно актуально для отдаленных слабоизученных

районов. Очень редко определяется ведущий вторичный минерал, но установить однозначно тип (фацию) метасоматоза невозможно.

В СССР и России интенсивно развивались методы моделирования кинетических (неравновесных) или открытых систем; они актуальны при изучении процессов с участием магматических флюидов (Арискин, Бармина, 2000; Бессонова, 2004; Голубев, 1972; Голубев, Шарапов, 1984; Чудненко, 2010; Шарапов и др. 2012; Шевко, 2018). Такие процессы преобладают в системах активных вулканов; разработаны основы моделирования подобных систем. Кинетические модели рассчитываются на основе фактических данных геохимии, гидрогеохимии, изучаются эманации газов, фумарол (Бочарников, 1998; Геотермальная..., 2021; Злобин, Высоков, 2004; Калачева и др., 2022; Кононов, 1983; Пономарев и др., 2003; Топчиева и др., 2018; Чаплыгин, 2009; Шакиров, 2014).

При картировании зон флюидопроводников геофизические и петрофизические методы использовались только дополнительно, обычно для оконтуривания магматических очагов (Бессонова, 2004; Чудненко, 2010; Шарапов и др., 2012; Шевко, 2018). Влияние геофизических полей на процессы метасоматоза предполагал еще Д.С. Коржинский (1969, 1973, 1993), но рассчитать эти эффекты в те годы не смогли, поэтому в основополагающей формуле термодинамического потенциала предлагалось пренебречь этой составляющей.

При расчете значений отношений естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) использовались фондовые материалы рядовых крупномасштабных аэрогаммаспектрометрических съемок, которыми до 2000-х гг. были почти полностью покрыты известные рудные районы Приамурья. Планомерно исследовались вулканоплутонические пояса. Большинство этих данных существует в виде карт на бумаге; построение карт отношений ЕРЭ при рядовых съемках практиковалось в редчайших случаях. Большинство карт отношений ЕРЭ строились автором вручную в пределах относительно небольших перспективных площадей.

Массовые статистические расчеты по данным аэрогаммаспектрометрии также велись автором вручную, на основе вариационных кривых, построенных с использованием формулы Стэрджесса. Обычно эти кривые близки к гауссиане, что позволило графически оценить величину погрешности (стандартного отклонения) и доверительного интервала. Определения статистических терминов даны в работе (Корн, Корн, 1974); величина доверительного интервала — основная мера оценки точности вычислений.

Современные аэрогеофизические съемки автоматизированы, карты отношений ЕРЭ используются чаще, но этих материалов недостаточно. В XXI в. используется аппаратура много большей точности, но высота полетов по сравнению со старыми съемками резко увеличилась. Поэтому современные аэрогаммаспектрометрические данные, практически по точности близки к имеющимся старым, откуда вытекает теоретическая возможность и необходимость использования аэрогеофизических материалов 1965–2000 гг.

Поисковые, геолого-геохимические, наземные крупномасштабные работы редко включали проведение специализированных исследований с построением карт метасоматоза. В связи с этим, с определением фаций метасоматоза возникали большие трудности; чаще всего на производстве ограничивались описанием ведущих ассоциаций вторичных минералов. Концентрически-кольцевая зональность метасоматитов в рудных полях и узлах — факт, давно подтвержденный геолого-геохимическими методами (Козлов, Арзамасцев, 2015; Коржинский, 1969, 1993; Метасоматизм..., 1998; Плющев, Шатов, 1985; Плющев и др., 2012), Тем не менее, установление ее качественной и количественной выраженности по данным геофизических методов (аэрогаммаспектрометрии), по вышеизложенным причинам, представляло большие трудности. Многолетние работы автора на производстве привели к созданию качественной модели концентрически-кольцевой зональности метасоматоза, выраженной в рудных полях и узлах на картах отношений ЕРЭ. Модель применялась при выявлении перспективных объектов в крупном Гонжинском рудном районе.

Кроме широкого комплекса наземных геофизических и аэрогеофизических материалов, в т.ч., компьютеризированных карт отношений ЕРЭ, в Гонжинском районе (Амурская область) использовалось большое количество наземных геолого-геохимических данных по месторождениям и перспективным участкам. Показано: выраженная концентрически-кольцевая зональность метасоматитов четко проявлена на картах отношений ЕРЭ, что позволяет легко определить их характеристики. Были установлены признаки крупных рудных объектов с построением структурно-поисковых моделей их рудных полей. Геологические, горные работы, с эксплуатацией месторождений, которые ведутся в этом регионе по настоящее время, подтвердили эффективность такого подхода.

В работе (Володькова, 2020) графоаналитическим методом впервые получено решение дифференциальных уравнений, количественно описывающих процессы регионального инфильтрационного метасоматоза на основе данных

аэрогаммаспектрометрии. В Дальневосточном регионе такие процессы создают гидротермально-метасоматические системы рудных узлов и полей, диаметром порядка (10–20) км, связанные с относительно небольшими магматическими телами. С концентрически-кольцевыми контрастными гидротермально-метасоматическими системами такого вида ассоциируются многие известные месторождения Приамурья. Примеры таких систем в рудных полях известных месторождений Кондер, Белая Гора, Хинганское, особенности и местоположение этих объектов кратко описаны в работе (Володькова, 2020). Уравнение подтверждено экспериментально геофизическими моделями концентрически-кольцевых гидротермально-метасоматических систем, созданными по результатам интерпретации (Володькова, 2020).

Графическое решение уравнений инфильтрационного метасоматоза, рассчитанное с точностью доверительного интервала (Володькова, 2020), в данной статье представлено на рис. 1. Доверительный интервал составляет (2–3) Δ , где Δ — среднеквадратическая погрешность, поэтому графоаналитическое решение уравнений с учетом t -распределения Стьюдента (Корн, Корн, 1974) является весьма вероятным. С учетом погрешностей съемок, их технических особенностей, степени гладкости кривых (рис. 1), нормированных по фону структурно-формационных зон (СФЗ), сегодня проблематично получить более точное графоаналитическое решение дифференциальных уравнений. Будем считать полученную точность построения аналитических кривых максимально близкой к реальности.

Фигуративные точки эталонных характеристик типов (фаций) метасоматитов определены по моделям рудных полей Приамурья; их характеристики также рассчитаны с точностью доверительного интервала (Володькова, 2020). Рудных полей месторождений с хорошо изученными (в т.ч., методами аэрогаммаспектрометрии) системами регионального инфильтрационного метасоматоза в Приамурье немного. Поэтому, хотя эти данные формально рассчитаны с допустимой точностью доверительного интервала (Володькова, 2020), фактически их достоверность в ряде случаев невысока, иногда наличие конкретного типа метасоматоза слабо доказано геофизическими методами. На графиках уравнений метасоматоза заметно, что фигуративные точки отдельных типов метасоматоза слабо дифференцированы, иногда отмечаются значительные отклонения их от кривых метасоматоза. Некоторые типы метасоматитов, описанные Е.В. Плющевым с соавторами (1985, 2012), на уравнениях метасоматоза вообще не представлены (рис. 1).

Таким образом, истинная точность характеристик таблицы эталонных значений, приведенной в работе (Володькова, 2020) невысока. Для уточнения эталонной таблицы в работе (Володькова, 2020), с получением характеристик метасоматитов, близких к реальным, необходимо использование новых фактических данных по рудным полям небольших магматогенных объектов с контрастными гидротермально-магматическими системами. Для этого хорошо подходят геологические объекты, где для разных типов метасоматитов известны не только распределения аномалий отношений ЕРЭ, но также значения температуры или водородного показателя (многопараметрические системы). Геологические объекты с описанными свойствами идеально подходят для картирования метасоматитов. Подобные построения проведены в настоящей статье с использованием геолого-геофизических материалов по активным вулканам о. Итуруп (Курильские острова). Использовались первичные аэрогеофизические материалы (аэрогаммаспектрометрия, аэромагниторазведка масштаба 1:50000) по этой территории из отчета¹, которые были дополнены построенными автором картами отношений ЕРЭ и переинтерпретированы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Хотя фактическая точность расчета фигуративных точек метасоматитов невысока, в таблице эталонных значений (Володькова, 2020) и на рис. 1 в настоящей статье прослеживается общая закономерность изменения характеристик метасоматитов («генеральная последовательность»), в зависимости от вариаций параметров метасоматоза. Она соответствует известной таблице типов метасоматитов (Плющев, Шатов, 1985; Плющев и др., 2012). Таблица Е.В. Плющева с соавторами (1985), дополненная позднее полученными ими материалами, или «Основная таблица» (табл. 1), стала основой классификации метасоматитов в настоящей работе.

Существование «генеральной последовательности» и полного соответствия классификационной «Основной таблице» считается доказанным, если отмечается закономерное изменение характеристик надфоновых аномалий отношений ЕРЭ с ростом значений температуры и водородного показателя. С другой стороны, должна наблюдаться регулярность: разные фации метасоматитов распределяются равно-

¹ Шустова О.С. Отчет о результатах комплексной аэрогеофизической съемки масштаба 1: 50000 на Сахалине и Курилах в 87-91 гг. Хабаровск, 1991. Ф. ДТФГИ. 104 с.

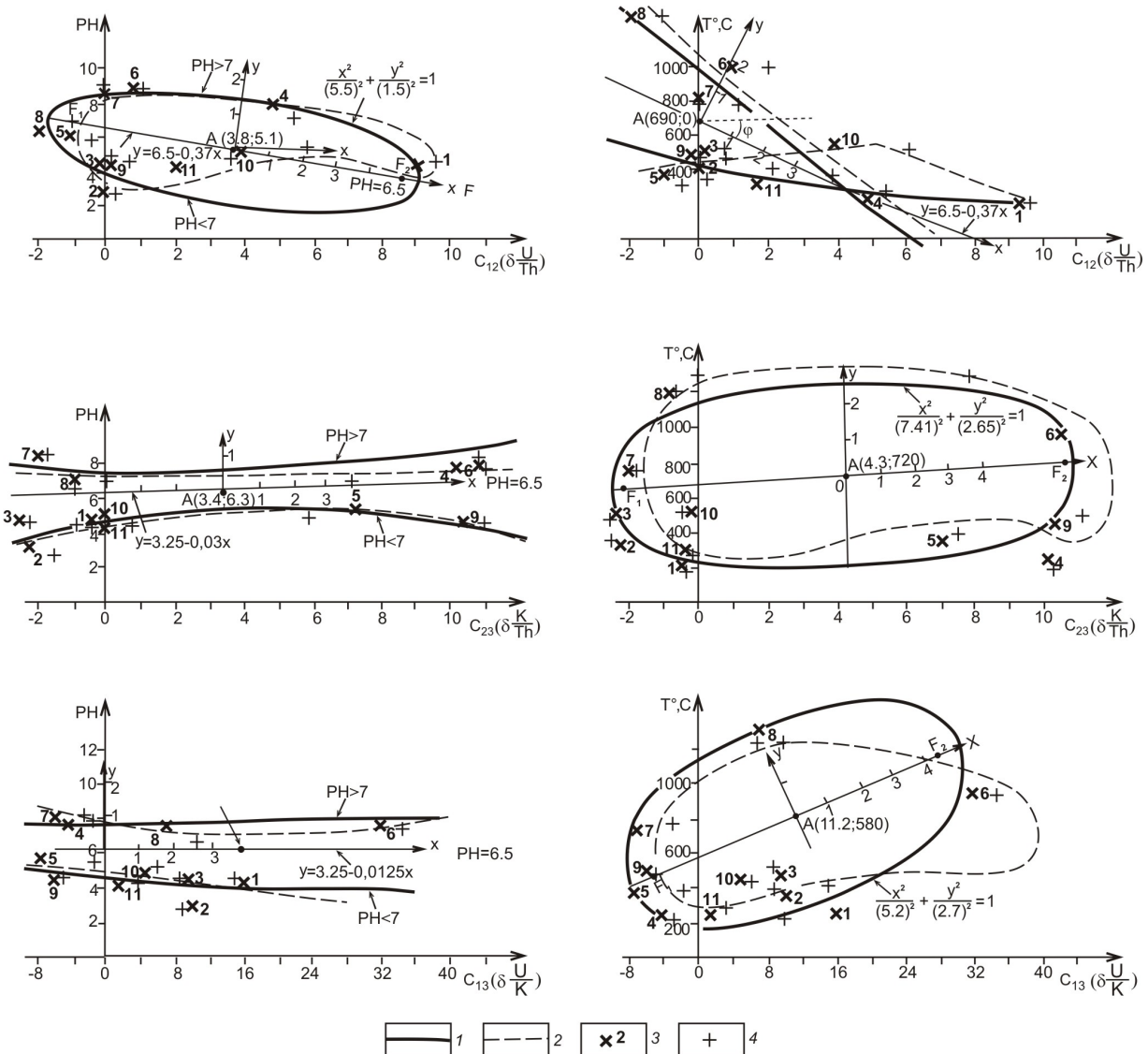


Рис. 1. Графическое решение уравнения метасоматоза (связь надфоновых аномалий отношений ЕРЭ, температуры, водородного показателя). При построении использованы гидротермально-метасоматические системы рудных объектов юга Дальнего Востока России. Надфоновые аномалии отношений ЕРЭ нормированы: 1 — по фону структурно-формационных зон (СФЗ); 2 — по гранитно-метаморфическому слою. 3, 4 — соответствующие фигуративные точки типов метасоматоза и их номера, в т.ч.: 1 — аргиллизиты; 2 — вторичные кварциты; 3 — кварц-турмалиновые; 4 — пропилиты кварц-эпидотовые; 5 — пропилитоиды кварц-серицитовые, турмалин-хлоритовые; 6 — оливинитовые, диопсидированные; 7 — полевошпат-пироксеновые; 8 — титаномagnetит-биотитовые; 9 — кварц-адуляровые, кварц-полевошпатовые; 10 — кварц-силикатные (биотититы); 11 — кварц-серицитовые (филлизиты).

Fig. 1. The Graphical representation of the metasomatism equation (relationship of between background-level anomalies in NRE ratios, temperature, and pH). The graph was constructed using hydrothermal-metasomatic systems from ore deposits in the southern Far East of Russia. Above-background anomalies in NRE ratios are normalized: 1 — against the structural-formational zones, 2 — against the granite-metamorphic layer. 3, 4 — corresponding figurative points of metasomatism types and their numbers, including: 1 — argillissites, 2 — secondary quartzites, 3 — quartz-tourmaline, 4 — propylites quartz-epidote, 5 — propylitoid quart-sericite, tourmaline-chlorite, 6 — livine, diopside, 7 — feldspar-pyroxene, 8 — titanomagnetite-biotite, 9 — quartz-adular, quartz-feldspar, 10 — quartz-silicate (biotite quartz), 11 — quartz-sericite (phylizites).

мерно и контрастно отличаются между собой по параметрам надфоновых аномалий ЕРЭ.

Особенности «генеральной последовательности» иллюстрирует анализ фигуративных точек метасоматитов на графиках уравнения метасоматоза по наиболее хорошо изученным

объектам: месторождение Белая Гора в Нижне-Амурском районе (рис. 1, точки 1, 2), месторождение Хинганское в ЕАО (рис. 1, точки 4, 5), месторождение Кондер в Аяно-Майском районе (рис. 1, точки 6, 7, 8). По номеру точки на графиках метасоматоза устанавливается их

принадлежность конкретным объектам. Из анализа уравнения метасоматоза и имеющихся геолого-геофизических данных можно сделать некоторые выводы.

На графике $pH = f(C_{ij})$, точки 2, 1 и 9, (крайние подгруппы в «Основной таблице») расположены на двух полюсах большой оси эллипса либо гипербола (рис. 1). В тех же сегментах расположены фигуративные точки метасоматитов близкой подгруппы (табл. 1, рис. 1). С учетом зависимости $T = f(C_{ij})$ на уравнении метасоматоза (рис. 1) выше большой оси эллипсов либо вырожденных гипербол, предположительно, расположены метасоматиты мантийной природы, ниже оси — коровой.

Именно нижняя часть уравнения метасоматоза (кривая корового метасоматоза) полностью охарактеризована в «Основной таблице»: имеет температуру менее (700–900) °C, ее состав варьирует от аргиллизитов до кварц-адуляровых (полевошпатовых) метасоматитов. С учетом значений водородного показателя, ниже главной оси эллипсов расположены коровые метасоматиты нейтральной и низкой щелочности.

В «Основной таблице» метасоматитов (табл. 1) выделяется 6 вертикальных подгрупп (I–VI), отличающихся по критерию pH, каждая из подгрупп содержит несколько типов метасоматитов, с разной температурой образования. При увеличении температуры образования мета-

Таблица 1. Основная таблица (Классификация гидротермально-метасоматических пород)

Table 1. Main table (Classification of hydrothermal-metasomatic rocks)

Ряды	Группы и подгруппы					
	Кварц-светлослюдистая		Темноцветная		Полевошпатовая	
	1 (I)	2 (II)	1 (III)	2 (IV)	1 (V)	2 (VI)
I	Аргиллизит Q+HSer+K	Березит гидро- серицитовый Q+HSer+Chl+Cc	Пропилит хлоритовый Ep+Chl	Пропилит полевошпат- хлоритовый Ep+Chl+Fsp	Фельдшпатит хлоритовый Fsp+Chl	Фельдшпатолит хлоритовый Fsp+Q+Hm+Chl
	<i>Приповерхностные низкотемпературные T = (от 50–100 до 200–250) °C</i>					
II	Вторичный кварцит Q+Ser	Березит серицитовый Q+Ser+Chl+Fsp	Пропилит актинолитовый Ep+Act	Пропилит полевошпат- актинолитовый Ep+Act+Fsp	Фельдшпатит актинолитовый Fsp+Act	Фельдшпатолит актинолитовый Fsp+Q+Act
	<i>Малоглубинные среднетемпературные T = (от 200–250 до 400) °C</i>					
III	Грейзен Q+Ms	Березито- грейзен Q+Ms+Fsp	Скарн Py+Gr+Amf+Ep	Скарн полевошпатовый Py+Amf+Fsp	Фельдшпатит щелочно- амфиболовый Fsp+Rib	Фельдшпатолит биотитовый Fsp+Q+Bt
	<i>Среднеглубинные высокотемпературные T = (от 400–450 до 600–800, иногда до 900) °C</i>					

Примечания. Таблица составлена на основе работ (Плюшев, Шатов, 1985; Плюшев и др., 2012). Ряды гидротермалитов: I — скрыто-мелкокристаллические, II — мелко-среднекристаллические, III — средне-крупнокристаллические ассоциации. Ассоциации: простые (однородные), сложные (неоднородные). Группы и подгруппы: жирным шрифтом обозначены номера подгрупп в тексте данной статьи. Ассоциации ведущих вторичных минералов: Q — кварц, HSer — гидросерицит, Ka — каолин, Ser — серицит, Ms — мусковит, Chl — хлорит, Cc — кальцит, Fsp — фельдшпатиты, Ep — эпидот, Act — актинолит, Py — пирит, Gr — гранат, Amf — амфиболит, Rib — рибекит, Hm — гематит, Bt — биотит. Курсивом даны приближенные значения температур образования гидротермалитов согласно (Плюшев и др., 2012). Характеристики pH растут от 1–2 для аргиллизитов до 10 у щелочных фельдшпатитов (Плюшев и др., 2012).

Notes. The table is based on the works by (Plyushchev, Shatov, 1985; Plyushchev et al., 2012). Hydrothermal series: I — crypto-fine-crystalline, II — fine-to-medium-crystalline, III — medium-to-coarse-crystalline associations. Associations: simple (homogeneous), complex (heterogeneous). Groups and subgroups: subgroup numbers in bold in the text of this article (part two). Associations of major secondary minerals: Q — quartz, HSer — hydrosericite, Ka — kaolin, Ser — sericite, Ms — muscovite, Chl — chlorite, Cc — calcite, Fsp — feldspatite, Ep — epidote, Act — actinolite, Py — pyrite, Gr — garnet, Amf — amphibolite, Rib — riebeckite, Hm — hematite, Bt — biotite. The values in italics are approximate formation temperatures of hydrothermalites according to (Plyushchev et al., 2012). pH characteristics range from 1–2 for argillizites to 10 for alkaline feldspatites (Plyushchev et al., 2012).

соматитов в каждой подгруппе нарастает степень молекулярной диссоциации, но значение pH падает. При делении оси x величин отношений ЕРЭ на шесть интервалов $\Delta_x = (C_{ijmax} - C_{ijmin})/6$ ширина каждого интервала $\Delta_x > 2 \Delta$ (где Δ — доверительный интервал). По оси y также выделяется 6 интервалов $\Delta_y > 2 \Delta$. Следовательно, каждая фация метасоматоза обладает конкретным набором параметров с большим запасом точности, что теоретически обеспечивает их уверенное выделение.

Небольшие отклонения фигуративных точек от генеральной последовательности связаны, вероятно, с погрешностями в определении экстремальных характеристик метасоматоза, но иногда наблюдаются значительные отскоки. Если группа аргиллизитов-грейзенов из «Основной таблицы» (табл. 1), характеризуется относительно уверенно, для пропилитов выделяются две колонки: пропилиты однородной и неоднородной структуры (пропилит-полевошпатовые). Наличие двух колонок пропилитов обусловлено первоначальным составом пород, который важен даже при высокой степени метасоматоза. Основным эталоном ранее служили пропилиты Хинганского рудного поля (Шестернева, 1986), наличие двух колонок пропилитов игнорировалось: поэтому характеристики группы пропилитов необходимо откорректировать, с добавлением новых опытных данных.

В «Основной таблице» (табл. 1) метасоматиты мантийной природы не описаны, но на графиках уравнений метасоматоза они образуют высокотемпературную верхнюю ветвь, симметричную нижней. Метасоматиты мантийной природы высокотемпературные, сформированы под сильным воздействием глубинных (мантийных) флюидов. Экспериментально эту ветвь подчеркивали фигуративные точки 6, 7 и 8, описывающие высокотемпературные метасоматиты Кондера (рис. 1). Кондер — уникальный по структуре, составу, рудной специфике и другим признакам, но недостаточно изученный массив ультраосновных-щелочных платиноносных пород. На хорошо изученном массиве ультраосновных-щелочных пород Озерная Варака (Кольский п-ов) доказана длительность и многостадийность его формирования, контрастная зональность, широкое развитие ареалов высокотемпературных метасоматитов, интенсивно проработанных глубинными флюидами (Козлов, Арзамачев, 2015; Козлов и др., 2014). Все эти черты присущи также массиву Кондер (Мочалов, 2022; Проблемы..., 2016; Савватенков, Мочалов, 2022; Чекишева, Корольков, 2013). Участие глубинных флюидов на массиве Озерная Варака прямо подтверждается петрохимическими и изотопными анализами; точную границу между нижнекоровым

и чисто мантийным метасоматозом провести сложно. На графиках уравнения метасоматоза (рис. 1) центральной оси эллипсов и гипербол соответствует температура $T = 700^\circ\text{C}$ и водородный показатель $\text{pH} = 6.5$; все фигуративные точки с более высокими значениями температуры и водородного показателя относятся к области мантийного ультраосновного-щелочного метасоматоза. По данным Г.П. Дворника (2020) и Е.В. Плющева с соавторами (1985, 2012), нижняя граница высокотемпературных метасоматитов составляет $600\text{--}800^\circ\text{C}$, т.е. данные вполне сопоставимы. Более точно разделить метасоматиты Кондера на условно мантийные и нижнекоровые сложно. По данным Е.В. Плющева с соавторами (2012) изредка верхняя граница формирования среднеглубинных высокотемпературных метасоматитов может достигать значения 900°C , т.е., по нашим данным, попадает в область мантийного метасоматоза.

В работе (Володькова, 2020) приводятся старые фондовые и литературные названия метасоматитов Кондера, этого было достаточно для предварительного выделения мантийной ветви метасоматоза (рис. 1). Разными авторами природа и состав и названия некоторых из них были уточнены (Проблемы..., 2016; Чекишева, Корольков, 2013). В настоящей работе рассматриваются дополнительные объекты мантийной природы (Озерная Варака, кальдера Медвежья), поэтому при сравнении метасоматитов Кондера с ними необходимо использовать уточненные характеристики состава мантийных метасоматитов. Если предположить существование «генеральной последовательности» на кривой мантийного метасоматоза, с учетом их типа, состав пород между двумя полюсами верхней ветви варьирует от железистых (магнетит и титаномагнетит-содержащих) до магнезиальных (оливинитов). На кривых мантийного метасоматоза (рис. 1) отражены производные глубинного метасоматоза с повышенной и высокой щелочностью. С учетом данных T и pH разных типов метасоматитов (Дворник, 2020; Метасоматизм..., 1998; Плющев и др., 2012; Юричев, 2015), делаем окончательный вывод, что нижняя часть эллипсов описывает низко-высокотемпературные коровые метасоматиты; верхняя, помимо мантийных производных также может включать высокотемпературные нижнекоровые метасоматиты (рис. 1).

Все эти факты соответствуют идеальной модели «генеральной последовательности». При этом особую роль играет график $\text{pH} = f(\delta\text{K}/\text{Th})$, т.к. калий определяет щелочность пород. В средней части нижней гипербола $\delta\text{K}/\text{Th} = 4\text{--}6$ сосредоточены метасоматиты корового происхождения максимальной щелочности ($\text{pH} = 5\text{--}6.5$). По «Основной таблице» они соответствуют

полевошпатовым пропилитам и фельдшпатитам, экспериментальных данных по которым нет. Слева и справа к ним примыкают группы с относительно меньшими значениями рН: фельдшпатолиты и пропилиты третьей подгруппы. Отрицательные значения $\delta K/Th = -2-0$ соответствуют продуктам максимального кислотного выщелачивания (аргиллизиты, вторичные кварциты). В центральной части верхней гиперболы минимальными значениями рН характеризуются, предположительно, фельдшпатиты и фельдшпатолиты, частично проработанные глубинными флюидами.

На графике $T = f(\delta U/K)$ (рис. 1) большая ось эллипса резко наклонена, вероятно, в связи с сильным влиянием эффекта молекулярной диссоциации при повышении температуры; четко определяются «мантийная» и «коровая» части. В нижней части эллипса выделяются сегменты продуктов кислотного выщелачивания, кварц-полевошпатовых метасоматитов и пропилитоидов. На графике $pH = f(\delta U/Th)$ нижняя кривая также наклонена и определяет эффект падения значения рН с ростом температуры в каждой группе коровых метасоматитов. При этом мантийная кривая $pH = f(\delta U/K)$ практически горизонтальна. Все эти факты также отвечают модели «генеральной последовательности», но доказать регулярность вариаций характеристик метасоматитов сложнее из-за неточностей и аномалий в определении фигуративных точек.

При рассмотрении некоторых аномалий фигуративных точек типов метасоматоза характеристики коровых низко-среднетемпературных эпидот-кварцевых пропилитов Хинганского рудного поля (рис. 1, точка 4), на графиках $pH = f(C_{ij})$, попадают в область мантийного метасоматоза. Несоответствие объясняется их корреляцией с ареалом трубообразного брекчированного тела, интенсивно проработанного глубинными газовыми эманациями (Копылов и др., 2004; Коростылев и др., 2006). Влияние флюидов сложного состава и наложенной минерализации, по-видимому, приводит к смещению фигуративной точки за пределы «интервала пропилитов» в мантийную область. Метасоматическая зональность Хинганского рудного поля отлично выражена (Володькова, 2020). И.Н. Шестерневой (1986) здесь проводились специализированные работы по картированию метасоматитов. Полученные много позже данные Хинганского ГОКа (Коростылев и др., 2006) показывают, что во внутреннем брекчированном теле сосредоточены образованные при температуре 450–600 °С кислые кварц-мусковит-топазовые грейзены. В близповерхностных условиях они переработаны низко-среднетемпературными процессами нейтральной и слабой щелочности; отмечается

явное наложение высокотемпературных глубинных флюидов. Вне центрального тела отмечается пропилитизация, по составу преобладают кварц-флюорит-хлорит-серицитовые разности. Хинганское рудное поле связано с гранит-порфирами в ареале толщ эффузивов кислого состава; полевые шпаты в пределах рудного поля отмечаются редко, распространен адуляр. Сложности генезиса затрудняют использование характеристик этого рудного объекта в качестве эталонных. Классические пропилиты формируются в комплексах среднего-основного состава и часто содержат полевые шпаты. Значение их водородного показателя рН = 4.0–7.0; именно такие комплексы распространены на о. Итуруп (Злобин, Высоков, 2004; Рычагов, 2003; Рычагов, Степанов, 1994).

На кривых метасоматоза (рис. 1) отмечается полное отсутствие данных по некоторым подгруппам «Основной таблицы»; особенно плохо отражены фельдшпатит (полевошпат) — фельдшпатолитовые метасоматиты. Местоположение и данные по картированию метасоматитов на участке Ночном (пример медно-порфирового объекта, бассейн р. Анюй, Центральный Сихотэ-Алинь) даны в работе (Володькова, 2020). Здесь проводились комплексные геолого-геофизические исследования В.В. Вертоградовым с соавторами (1994)², причем, Н.А. Ситников, совместно с С.М. Родионовым, вели специализированные работы по изучению метасоматоза участка. С.М. Родионовым, согласно его концепции медно-порфировых объектов, здесь были выделены филлизиты (серицитолиты) и биотититы (биотит-сидерофиллитовые метасоматиты), позже описанные В.И. Алексеевым (Алексеев, 2012; Родионов, 2006). Несмотря на отлично выраженную метасоматическую зональность и проявленность на картах отношений ЕРЭ, характеристики метасоматитов здесь определены некорректно. Филлизиты и биотититы согласно табл. 1, должны относиться к крайним подгруппам: II (березиты-серицитолиты) и VI (фельдшпатолиты), Упомянутые подгруппы расположены вблизи двух разных фокусов эллипса. На графике 1 расстояние между их фигуративными точками около 2 Δ, т.е., эти типы метасоматоза относятся к одной или смежным группам. В.В. Вертоградовым с соавторами (1994)², составлена фондовая карта фактов, где на участке Ночном выделялись процессы окварцевания, кварц-серицитовые метасоматиты и пропилиты и отсутствовали филлизиты и биотититы. За последние годы в Хабаровском крае открыты

² Вертоградов В.В., Лысенко О.Д., Ситников Н.А. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ на рудном поле проявления Ночной. Хабаровск, 1993. Ф. ДТФГИ. 73 с.

крупные золото-медно-порфировые месторождения, где концентрически-зональные метасоматиты довольно близки к схеме В.В. Вертоградова с соавторами (Минина и др., 2019; Петров и др., 2019). В связи с многообразием видов медно-порфировых объектов особенности их метасоматоза надо рассматривать отдельно для разных типов месторождений. Наиболее точно на участке Ночном определены аномальные характеристики отношений $EP\Delta C_{ij}$, они откорректированы и среднее из двух близких значений, предположительно, характеризует кварц-серицитовые метасоматиты II–III подгруппы, с параметрами $\delta U/Th = 3.0$; $\delta K/Th = -0,1$; $\delta U/K = 3,7$; $pH = 3-4$; $T = 200-400^\circ C$.

Таким образом, аномалии значений фигуративных точек имеют логичное объяснение, они в целом, соответствуют «генеральной последовательности». Конкретные типы изменений в идеале могут быть выделены однозначно, но ощущается явная нехватка экспериментальных данных.

Значения отношений $EP\Delta$ магматических комплексов Курил разного состава образуют тренды (Володькова, 2007), на форму которых сильно влияет интенсивность газовой активности и тип щелочности вулканитов; правило постоянства отношений $EP\Delta$ и нормирование значений аномалий $EP\Delta$ по фону СФЗ (Володькова, 2020) здесь не работает. Тренды магматических комплексов Курил построены на основе наземных геохимических данных, по величинам отношений $EP\Delta$, они сопоставимы с аэрогеофизикой (Володькова, 2007). Данные описывают всю Курильскую дугу, частично — Камчатку, т.е., являются универсальными. Кривые гладкие, образуют четкую закономерность, что подтверждает широкое развитие слабоизмененных однотипных магматических комплексов в вулканических системах Курил. Это теоретически делает возможным выявления ореолов метасоматоза в системах активных вулканов Курил, где метасоматические процессы отдельных вулканических систем изучались геолого-геохимическими методами. Картирование метасоматитов возможно, если в пределах вулканической системы преобладают вулканиты постоянного состава и влияние газовой компоненты при их формировании резко ограничено (Володькова, 2007). Тогда метасоматиты выражаются локальными аномалиями отношений $EP\Delta$, нормированными по фону, которым служат среднестатистические характеристики слабоизмененных магматических комплексов соответствующей вулканической системы. Влияние газовой составляющей малоизучено, оценить его невозможно, но иногда его можно исключить. Например, для всех вулканов везувианского типа характерны кальдеры, которые образуются при

мощном (часто фреатическом) взрыве вулканических газов (Володькова, 2007). Тогда большая часть газов улетучивается; если внутри кальдеры распространен единый комплекс вулканитов с относительно постоянным фоном, существует возможность выявить надфоновые аномалии. Если в пределах вулканической структуры состав пород резко варьирует, имеет место постоянный мощный приток парогазовых флюидов, задача картирования метасоматитов практически неразрешима.

На активных вулканах высока фумарольная деятельность, гидротермально-метасоматические системы находятся на стадии формирования, поэтому метасоматиты часто представлены относительно небольшими по площади ареалами.

Вулканические системы Курил многими авторами изучались параметрически, наряду с описаниями метасоматитов, определялись температуры, реже — значения водородного показателя (Бочарников, 2002; Бочарников и др., 1998; Геотермальная..., 2021; Злобин, Высоков, 2004; Рычагов, 2003; Юричев, 2015). Триада значений надфоновых отношений $EP\Delta$ однозначно описывает тип метасоматоза (Володькова, 2020). За счет дополнительных параметрических характеристик, с математической точки зрения, получается переопределенная система уравнений, что резко повышает достоверность решения задачи. Критерием метасоматической природы выявленных надфоновых аномалий отношений $EP\Delta$ может служить их полное совпадение по всем параметрам с универсальными кривыми метасоматоза (рис. 1). С использованием «генеральной последовательности» и материалов разных авторов, попытаемся определить тип метасоматоза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вулкан Кудрявый. В центре кальдеры Медвежьей (о. Итуруп), (рис. 2, 3), находится активный вулкан Кудрявый. Кальдера Медвежья, диаметром до 8–9 км относится к везувианскому типу, здесь выделяются остатки двух древних сомм, центральный стратовулкан (Кудрявый) с кратером и еще несколько конусов и куполов (Горшков, 1967; Рыбин и др., 2018). Вулканы везувианского типа формируются как минимум в два этапа (Володькова, 2007). В течение первого обычно извергаются вулканиты разного состава, но одного типа щелочности; по характеристикам отношений $EP\Delta$ они образуют четкий тренд. В конце цикла формируется кальдера и гидротермально-метасоматическая система вулкана; инфильтрационные региональные метасоматиты могут отмечаться в пределах всей

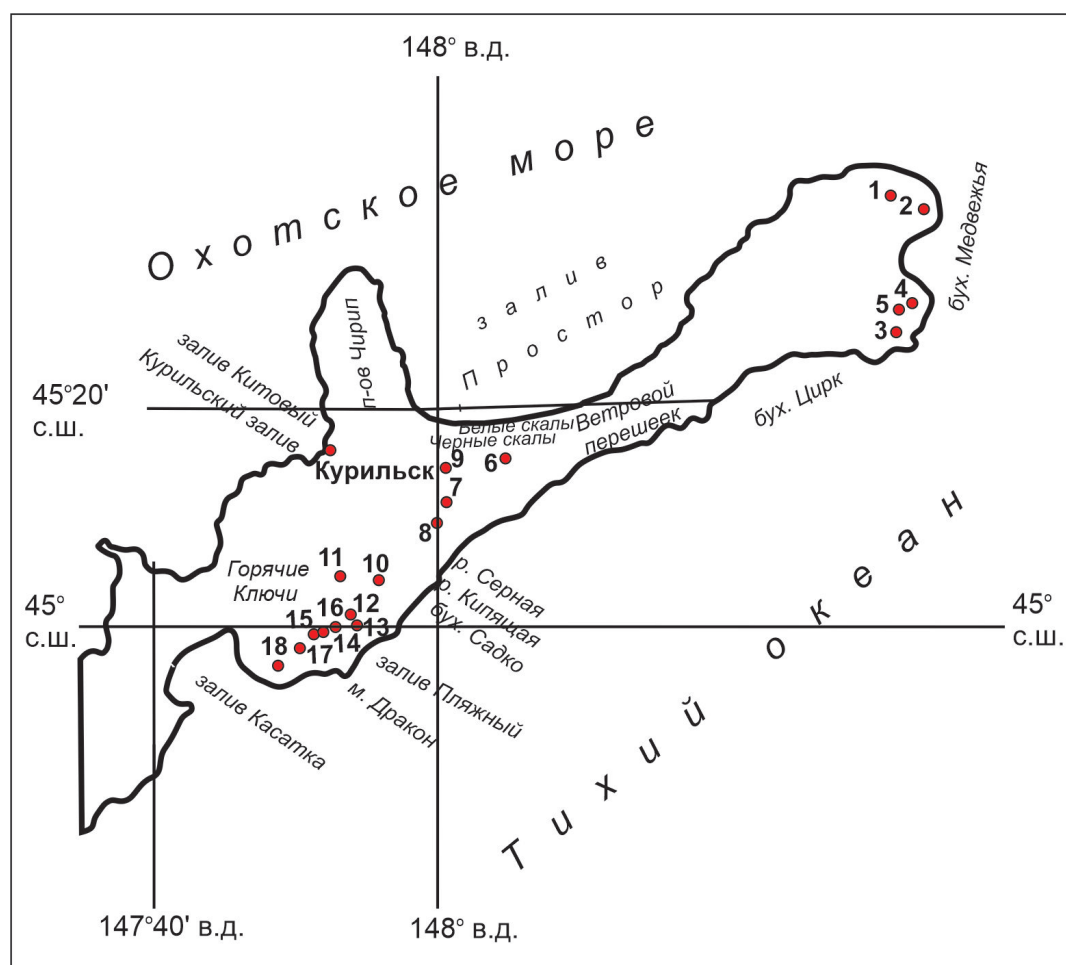


Рис. 2. Схема упомянутых в статье основных структур фрагмента о-ва Итуруп. Названия вулканических структур: 1 — Камуй; 2 — Демон; 3 — Медвежья; 4 — Кудрявый; 5 — Меньшой Брат; 6 — г. Широкая; 7 — г. Горелая; 8 — Баранского; 9 — Шляпа; 10 — Купол; 11 — Крыло; 12 — Тебенкова; 13 — Мачеха; 14 — Дракон; 15 — Ермак; 16 — Ивана Грозного; 17 — Мотопури; 18 — Ребуншири. Положение структур указано на картах острова. Особенности строения по (Горшков, 1967).

Fig. 2. The scheme of the main structures of the island of Iturup segment mentioned in the article. Names of volcanic structures: 1 — Camuy; 2 — Demon; 3 — Medvedhya; 4 — Cudryviy; 5 — Menshoy Brat; 6 — Gorelay; 8 — Baranskogo; 9 — Shlaypa; 10 — Cupol; 11 — Crylo; 12 — Tebenjkova; 13 — Macheha; 14 — Dracon; 15 — Ermak; 16 — Ivana Groznogo; 17 — Motonopuri; 18 — Rebunschiri. The position of the structures is indicated on the maps of the island. Structural characteristics are based on (Gorschkov, 1967).

структуры. Стратовулканы образуются в начале последнего цикла, под воздействием активных глубинных магматических очагов и процессов дегазации. Иногда новые этапы по отношению к предыдущим отличаются по типу щелочности; за счет продувки глубинными газами активных магматических очагов развиваются явления «магнетитовой отсадки» (Володькова, 2007; Холоднов и др., 2016). Рудная перспективность такой системы зависит от степени развития регионального метасоматоза и наличия мантийной составляющей.

В эродированной внутренней части кальдеры Медвежьей закартированы потоки лав и относительно молодые комплексы, преимущественно, андезибазальтового и базальтового состава, пониженной либо нормальной щелочности

(Горшков, 1967; Кузьмин и др., 2023; Мартынов, 2010; Мартынов и др., 2010; Низаметдинов, 2022; Пономарев и др., 2003; Рыбин и др., 2018; Чаплыгин, 2009; Чибисова и др., 2009). Стратовулкан Кудрявый и конусы других вулканов образуют хребет субширотного простирания. На вулкане Кудрявый широко распространены фумаролы; есть признаки недавней активности других конусов и куполов субширотного хребта (Меньший Брат). На оси субширотного хребта и южнее его выделяется несколько эффузивных и экструзивных куполов.

По материалам аэрогеофизической съемки масштаба 1:50000 (рис. 2, 3), кальдера Медвежья легко картируется с привлечением геологических данных (Горшков, 1967; Рыбин и др., 2018). Древние образования соммы и вмещающие ее

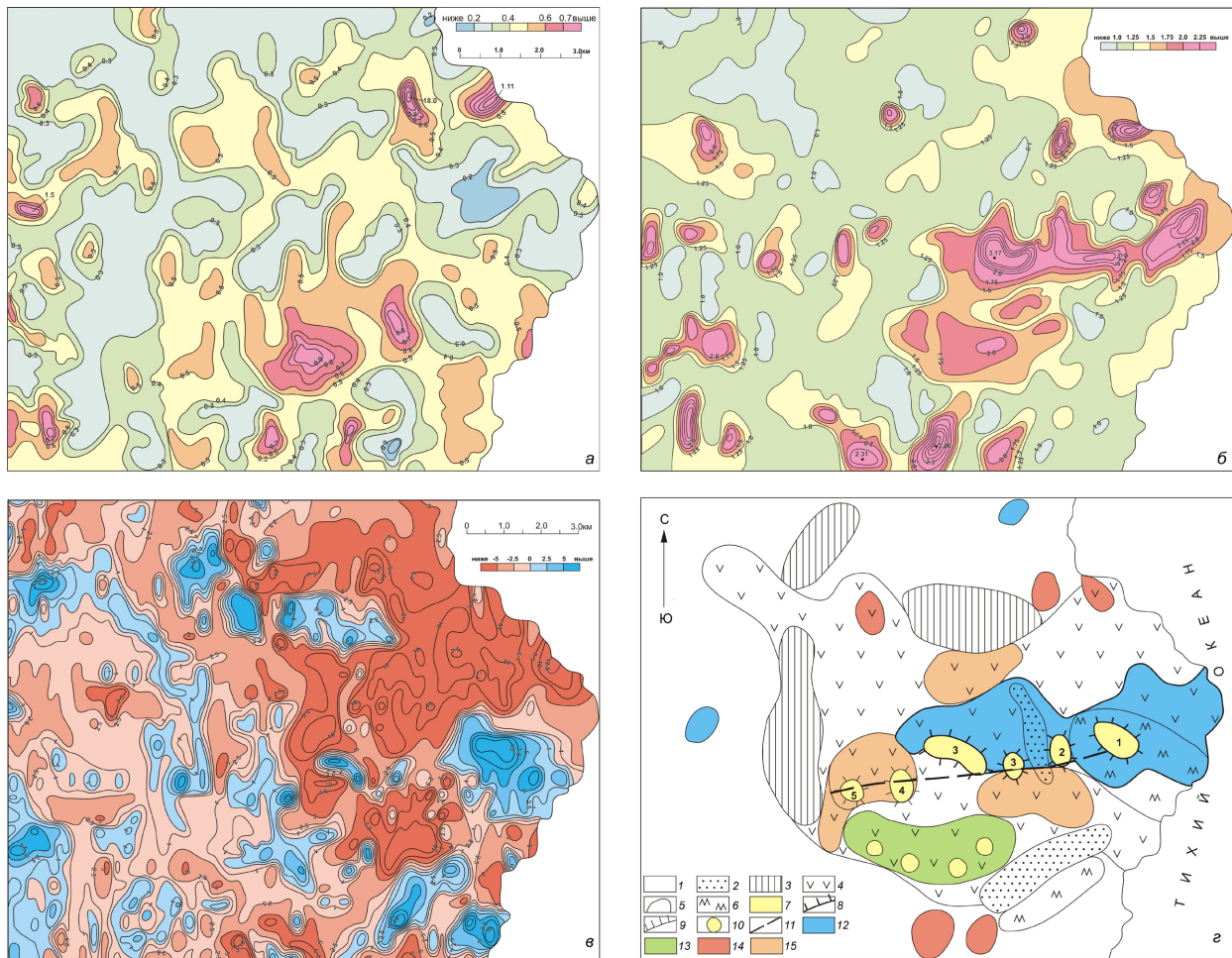


Рис. 3. Геолого-геофизические материалы по кальдере Медвежьей. *а, б* — карты отношений радиоактивных элементов (в условных единицах): *а* — уран-ториевых, *б* — уран-калиевых; *в* — карта аномального магнитного поля ΔT_a ($n \cdot 10^2$ нТл); *г* — схема интерпретации. 1 — древние вулканические комплексы; 2 — остатки древней соммы; 3 — остатки главной соммы кальдеры Медвежьей; 4 — молодые вулканы (андезито-базальты); 5 — контур магматических тел; 6 — ареалы «магнетитовой отсадки», 7 — центральные структуры, в т.ч.: 8 — конусы и жерла вулканов (1 — Медвежий, 2 — Средний, 3 — Кудрявый (основной кратер и кратер-паразит)); 9 — купола экструзивные и эффузивные, экструзии дацитов, в т.ч. (4 — Меньшой Брат, 5 — дацитовый купол), 10 — прочие экструзивные купола, преимущественно, дациты, 11 — ось Субширотного разлома; высокотемпературные метасоматиты, в т.ч., 12 — зона Субширотного разлома, 13 — ареал высокотемпературного метасоматоза в поле дацитовых куполов, 14 — выходы узких высокотемпературных струй, 15 — ареалы, связанные с экструзивным куполом Меньшой Брат.

Fig. 3. Geological and geophysical data for the Medvezhya Caldera. *a, b* — maps of radioactive element ratios (in conventional units): *a* — uranium thorium, *b* — uranium potassium; *v* — map of the anomalous magnetic field ΔT_a ($n \cdot 10^2$ nT); *z* — interpretation scheme. 1 — ancient volcanic complexes; 2 — remnants of the ancient somma; 3 — remnants of the main somma of the Medvezhya Caldera; 4 — young volcanics (andesite basalts); 5 — outline of magmatic bodies; 6 — areas of «magnetite settling»; 7 — central structures, including; 8 — volcanic cones and vents (1 — Medvezhiy, 2 — Sredniy, 3 — Kudryavyy (main crater and parasitic crater)); 9 — extrusive and effusive domes, dacite extrusions, including (4 — Menshoi Brat, 5 — dacite dome); 10 — other extrusive domes, predominantly dacites; 11 — axis of the Sublatitudinal Fault; high temperature metasomatites, including; 12 — Sublatitudinal Fault zone; 13 — area of high temperature metasomatism within the field of dacite domes; 14 — outcrops of narrow high temperature jets; 15 — areas associated with the Menshoi Brat extrusive dome.

породы выражены слабодифференцированным отрицательным магнитным полем ΔT_a величиной от -750 до -250 нТл. Андезибазальты, почти полностью заполнившие дно кальдеры, характеризуются дифференцированным магнитным полем ΔT_a интенсивностью от -1000 до +1000 нТл. К конусам вулканов приурочены

локальные магнитные аномалии интенсивностью до +1000 нТл и выше, что позволяет предположить наличие в глубинных камерах под вулканами явлений «магнетитовой отсадки». Цепь конусов вулканов образует субширотный хребет, связанный с зоной глубинного субширотного разлома, хорошо выраженного на картах

физических полей (рис. 3). Этот разлом без названия, картировался другими авторами (Рыбин и др., 2018), в авторской трактовке, он трассирует зону надфоновых аномалий ЕРЭ (рис. 3). На продолжении цепи конусов субширотного простирания картируются два вулканических купола, в т. ч., представленный магнезиальными базальтами экструзивный купол Меньший Брат (Кузьмин и др., 2023; Низаметдинов, 2022; Чибисова и др., 2009). Они выражены локальными положительными аномалиями магнитного поля относительно невысокой интенсивности 250–750 нТл. Очевидно, явления «магнетитовой отсадки» для этих куполов не типичны, что согласуется с их магнезиальным составом. На вершине купола Меньшой брат расположены два кратера, расстояние между которыми более 500 м. Здесь наблюдаются три свежих лавовых потока, длиной до 200–700 м. На южном склоне купола Меньший Брат выделяется самый мощный лавовый поток, длиной ≥ 4 км. Потoki лав повсеместно картируются узкими протяженными цепочками мелких аномалий магнитного поля. На дне кальдеры Медвежьей они выделяются на фоне базальтоидов. Хотя потоки лав отлично картируются, для упрощения они не показаны на схеме интерпретации (рис. 3).

Южнее субширотного разлома отмечается несколько эффузивных и экструзивных куполов и конусов, в т. ч., дацитового состава (Горшков, 1967; Рыбин и др., 2018). А.В. Рыбиным с соавторами (2018) выделялся также кольцевой разлом, трассирующий древние соммы, вблизи которого расположен южный ареал куполов и конусов. В кратере вулкана Кудрявый находится уникальное месторождение рения с возобновляемыми ресурсами (Бочарников, 2002; Злобин, Высоков, 2004; Чаплыгин, 2009). Региональные обобщения по метасоматитам кальдеры Медвежьей отсутствуют. На вулкане Кудрявый изучалась приповерхностная гидротермально-метасоматическая система, сформированная под воздействием метеорных вод; с ней также связан инфильтрационный метасоматоз (Бочарников, 2002). В зонах глубоких трещин, проявлен мантийный высокотемпературный метасоматоз или мантийные струи (Бочарников, 2002; Бочарников и др., 1998; Пономарев и др., 2003; Чаплыгин, 2009). Для приповерхностного метасоматоза типична температура

порядка (100–300) °С, зафиксированный нижний предел температур зоны выхода мантийных струй на поверхность 900 °С, обычно температура много выше. Для низкотемпературного метасоматоза типична аргиллизация (?); высокотемпературный метасоматоз представлен альбититами, пироксенитами, оливинитами (Бочарников, 2002).

Вулканиды кальдеры Медвежьей одного петрохимического типа и состава (Горшков, 1967; Мартынов и др., 2010; Рыбин и др., 2018), поэтому фоновая составляющая отношений ЕРЭ может быть определена по характеристикам наименее измененных вмещающих пород. Для расчета фона приняты: средние характеристики отношений ЕРЭ соммы ($U/Th = 0.25$; $K/Th = 0.30$; $U/K = 1.15$) и средние значения отношений ЕРЭ молодых вулканитов внутри кальдеры Медвежьей ($U/Th = 0.45$; $K/Th = 0.35$; $U/K = 1.35$). Принята фоновая составляющая, равная среднеарифметическому вышеописанных значений ($U/Th = 0.35$; $K/Th = 0.33$; $U/K = 1.25$).

С использованием фоновых характеристик и основ работ (Володькова, 2007, 2020), выявлены аномалии отношений ЕРЭ четырех групп (табл. 2). При истолковании аномалий отношений ЕРЭ возникают некоторые сложности.

Дно кальдеры Медвежьей почти повсеместно покрыто однотипными андезибазальтами и базальтами. Относительно небольшую площадь занимают купола, шлаковые конусы комплементарных (?) дацитов и конусы базальтов, которые теоретически могут создавать аномалии отношений ЕРЭ (Анфилов, 2010; Арискин, Бармина, 2000). Породы кислого состава считаются синкальдерными; стратовулканы сложены посткальдерными базальтами. По мнению разных авторов, эти комплексы — производные единого длительно существующего магматического источника (Мартынов, 2010; Низаметдинов, 2022; Рыбин и др., 2018; Чаплыгин, 2009). Достоверно оценить их характеристики из-за наличия регионального тренда магматических комплексов (Володькова, 2007) невозможно, но с учетом малой площадной распространенности дацитов и базальтов, вариациями их характеристик отношений ЕРЭ можно пренебречь. Поэтому можно считать: все крупные ареалы аномальных отношений связаны исключительно с гидротермально-метасоматическими процессами.

Таблица 2. Экстремальные значения аномалий отношений ЕРЭ метасоматитов кальдеры Медвежьей
Table 2. Extreme values of anomalies in the NRE ratios of the Medvezhya caldera metasomatites

№	Значения отношений ЕРЭ			Значения надфоновых аномалий ЕРЭ		
	U/Th	K/Th	U/K	$\delta U/Th$	$\delta K/Th$	$\delta U/K$
1	0.2	0.15	3.17	-1.5	-1.80	7.7
2	0.95	0.45	2.2	6.0	1.20	3.8
3	1.10	0.42	3.26	7.5	0.9	8.0
4	0.80	0.55	1.80	4.5	2.20	2.2

При изучении фумарольных полей и метасоматоза вулкана Кудрявого Р.Е. Бочарниковым (2002) сделан вывод о существовании долгоживущей парогазовой системы, где смешаны приповерхностные гидротермы и отмечается постоянный приток глубинных флюидов. Приповерхностная гидротермальная система имеет небольшой напор (скорость притока паров); ее производные — низкотемпературные комплексы осветленных пород ($T = 100\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Они образуют локальные ореолы в кратерах действующих вулканов, имеют повышенную кислотность и развиты только в парящих фумарольных полях. По составу эти ореолы близки к аргиллизитам (продуктам кислотного выщелачивания). Такая система — самый сложный объект интерпретации, но локальная площадная распространенность процессов позволяет ими пренебречь.

Доля мантийной составляющей в гидротермах системы вулкана Кудрявого, составляет не менее 10 % (Бочарников, 2002; Чаплыгин, 2009). Это сопоставимо с данными по массиву ультраосновных-щелочных пород Озерная Варака (Кольский п-ов). При проведении специализированных исследований на площади массива Озерная Варака отмечалась чрезвычайно широкая распространенность площадных ореолов метасоматитов глубинной природы (Козлов, Арзамасцев, 2014, 2015). По аналогии, хотя Р.Е. Бочарниковым (2002) непосредственно в кратере вулкана Кудрявого глубинные метасоматиты связывались только с узкими мантийными струями большого напора, за счет высокой степени мантийной проработки можно предположить их широкое площадное распространение на площади всей кальдеры Медвежьей. Таким образом, формирование региональных ореолов метасоматитов в пределах кальдеры Медвежьей осуществлялось под воздействием газовых высокотемпературных эманаций из глубинного (мантийного) магматического источника. Продукты регионального (инфильтрационного) метасоматоза выделяются в зонах повышенной трещиноватости и глубинных разломов, их можно уверенно отнести к высокотемпературным ($\Delta T > 800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Более точное определение температуры и водородного показателя пока невозможно. Их интерпретация проводится с использованием верхней полуоси эллипсов и вырожденных гипербол.

Нумерованные фигуративные точки на графике уравнения метасоматоза (рис. 1), соответствуют данным эталонной таблицы метасоматитов (Володькова, 2020). Эти данные послужили начальной основой, по которой определялась природа вновь полученных метасоматитов и делались попытки ее уточнения. Ярко выраженные высокотемпературные

метасоматиты мантийной природы широко развиты в зоне глубинного субширотного разлома, контролирующего крупнейшие разнотипные стратовулканы, в т.ч., Кудрявый и Меньший Брат. С этой зоной связан крупный ареал метасоматоза, выраженный пониженным калий-ториевым отношением ($K/Th < 0.2$) и аномалиями уран-калиевого отношения до $\delta U/K = 3.17$. Еще две небольшие аномалии аналогичного типа, в т.ч. в бассейне р. Медвежьей, выделены у внешнего подножия соммы. Возможно, они связаны с высокотемпературными струями мантийного вещества в зоне внешнего кольцевого разлома, окружающего сомму по (Рыбин и др., 2018). По всем характеристикам, этот тип метасоматоза (табл. 2, тип 1; рис. 1–3) близок к эталонным титаномagnetит-биотитовым метасоматитам Кондера (Володькова, 2020). Позже на Кондере эти комплексы описывались как косъвиты, титаномagnetит-апатит-флогопитовые клинопироксениты или щелочные метасоматиты (Проблемы..., 2016; Савватенков, Мочалов, 2022; Чекишева, Корольков, 2013). Для таких метасоматитов типичны повышенная железистость и щелочность, что согласуется с данными по кальдере Медвежьей. Вулкан Кудрявый относится к классу базальтовых стратовулканов, расположен в пределах крупного ареала метасоматитов (табл. 2, тип 1; рис. 3). Для него и близких к нему по типу вулканических конусов типичны обогащение магнетитом (титаномagnetитом), пироксеном, альбитизация (Бочарников, 2002), развитие магнетит-эгирипироксеновой ассоциации (Чаплыгин, 2009). Можно предположить, что эти метасоматиты отличаются очень высокой температурой формирования порядка $(1200\text{--}1400)\text{ }^{\circ}\text{C}$, и значением рН около 8.0. Даже на вулкане Меньший Брат, сложенном высокомагнезиальными базальтами, при метасоматической проработке мантийными газами, отмечается ожелезнение форстерита и альбитизация (Низаметдинов, 2022).

С учетом геологической схемы из работы (Рыбин и др., 2018), метасоматиты типа 3 (табл. 2; рис. 1–3) приурочены к зоне кольцевого разлома на периферии кальдеры Медвежьей. Они контрастно выделяются по характеристикам отношений ЕРЭ, но очень невелики по площади. По уран-ториевым характеристикам они смещены в область высокомагнезиальных пород (оливинитов?), по калий-ториевым и уран-калиевым приближаются к области высокожелезистых метасоматитов (явное несоответствие). Вероятно, они длительно формировались под воздействием узких струй мантийных газов и вмещающих комплексов корового происхождения, имеют сложную природу. Хотя связь с высокотемпературными мантийными струями

очевидна; локальное распространение не позволяет установить их тип.

Можно отметить площадную корреляцию ореолов высокотемпературных метасоматитов (табл. 2, тип 2, 4; рис. 1–3) и выходов кислых пород синкальдерного этапа, окружающих экструзивный купол Меньший Брат. Вероятно, они связаны генетически. Метасоматиты групп 2 и 4 также сходны по характеристикам аномалий отношений ЕРЭ. Вероятней всего, эти комплексы близки по типу и различаются по степени метасоматической проработки. Наиболее контрастно выражен на картах аномалий отношений ЕРЭ ареал, включающий поля дацитов в южной части кальдеры Медвежьей. С учетом данных из работы (Рыбин и др., 2018), они коррелируют с зоной глубинного разлома. По характеристикам аномалий отношений ЕРЭ, эти метасоматиты близки к высокотемпературным альбититам. Их степень проработки, по-видимому, невысока, поэтому более точное определение их состава и термодинамических параметров невозможно.

Полученные данные позволяют сделать вывод о региональном высокотемпературном метасоматозе, преобладающем в системе кальдеры Медвежьей. В большинстве случаев, точно определить их состав и параметры невозможно, но предполагаемые типы метасоматоза коррелируют с данными Р.Е. Бочарникова (2002), И.Р. Низаметдинова (2022) и И.В. Чаплыгина (2009). Как эталонные можно использовать только характеристики метасоматитов типа I — магнетит-эгирин-пироксеновая ассоциация по И.В. Чаплыгину (2009). Тем не менее, данные по кальдере Медвежьей важны: они подтверждают верность выводов о «генеральной последовательности» в фактически слабо обоснованной высокотемпературной (мантийной) области.

Система горы Широкой (рис. 2, 4) примыкает к западной границе первоначально подводной грабенообразной структуры вблизи Ветрового перешейка, позднее полностью заполненной пемзовыми туфами и эффузивами кислого состава (Витухин и др., 1996; Дегтярев и др., 2016; Смирнов и др., 2017).

На Ветровом перешейке выявлен блок, сложенный кислыми эффузивами, включающий липариты и пемзы (Витухин и др., 1996). Поблизости находятся известные на побережье о. Итуруп обнажения — Белые (пемза) и Черные (лавы андезитов) Скалы. Вблизи Ветрового перешейка предполагалось и было доказано бурением существование доледниковой крупной кальдеры возрастом около 20000 лет, возникшей на месте сильнейшего подводного извержения при температуре 800 °С и эксплозивных взрывов (Геотермальная..., 2021; Дегтярев и др., 2016; Злобин, Высоков, 2004; Рычагов, 2003; Смирнов

и др., 2017). По С.З. Смирнову с соавторами (2017), эпицентр кальдеры совпадает с горой Клубба и насажен на ось поперечного разлома, трассирующего Ветровой перешеек. На основе аэрогеофизических данных чуть западнее автором настоящей статьи выделена почти аналогичная кальдера с центром гора Широкая (рис. 4), которой соответствует контрастная зональная система метасоматитов. По-видимому, при формировании кальдеры Широкой сильнейшее эксплозивное извержение способствовало выбрасыванию на большое расстояние огромного объема пемзовых туфов. Известно, что пемзовые туфы в этом районе содержат значительное количество включений кварца, пироксена, плагиоклаза, магнетита (Смирнов и др., 2017). Кальдера Широкая картируется слабо дифференцированным знакопеременным магнитным полем интенсивностью 0–500 нТл. Через эпицентр кальдеры, в северо-западном направлении, протягивается линейная ось (разлом?), на которую насажены интенсивные локальные аномалии магнитного поля. На южном окончании зоны сконцентрированы отрицательные магнитные аномалии интенсивностью более –2000 нТл. Отмечено, что в пемзах много кристалликов магнетита, который за счет явлений «магнетитовой отсадки» обычно сконцентрирован в придонных частях корово-мантийных очагов (Смирнов и др., 2017; Холоднов и др., 2016). Очевидно, сила взрыва была так велика, что тяжелые минералы, вместе с пемзой были выброшены на поверхность. Тогда локальные отрицательные аномалии магнитного поля ΔT_a картируют эксплозивные воронки — следы опустошенных магматических очагов, возможно, расположенные на небольшой глубине и заполненные легкими породами либо водой. Языки лав среднего состава выделяются в магнитном поле линейными цепочками и зонами небольших аномалий интенсивностью около 0 – +500 нТл. Подобные структуры в кальдере Широкой практически отсутствуют. Субпараллельно зоне эксплозивных воронок (очагов) протягивается цепь довольно крупных положительных аномалий магнитного поля ΔT_a интенсивностью до +250 – +500 нТл. Подобные аномалии, по нашему мнению, типичны для небольших куполов, конусов среднего (андезитового) состава, сформированных в более позднюю эпоху вулканической активности. Они сосредоточены в северо-западной части кальдеры.

Благодаря однородности покровов, характеристики фона вмещающих пород определить легко, они составляют: (в условных единицах): $U/Th = 0.55$, $K/Th = 0.4$, $U/K = 1.5$ (рис 4). Хотя при формировании кальдеры огромную роль сыграли флюиды и вулканические газы, их взрывной характер уменьшает погрешности

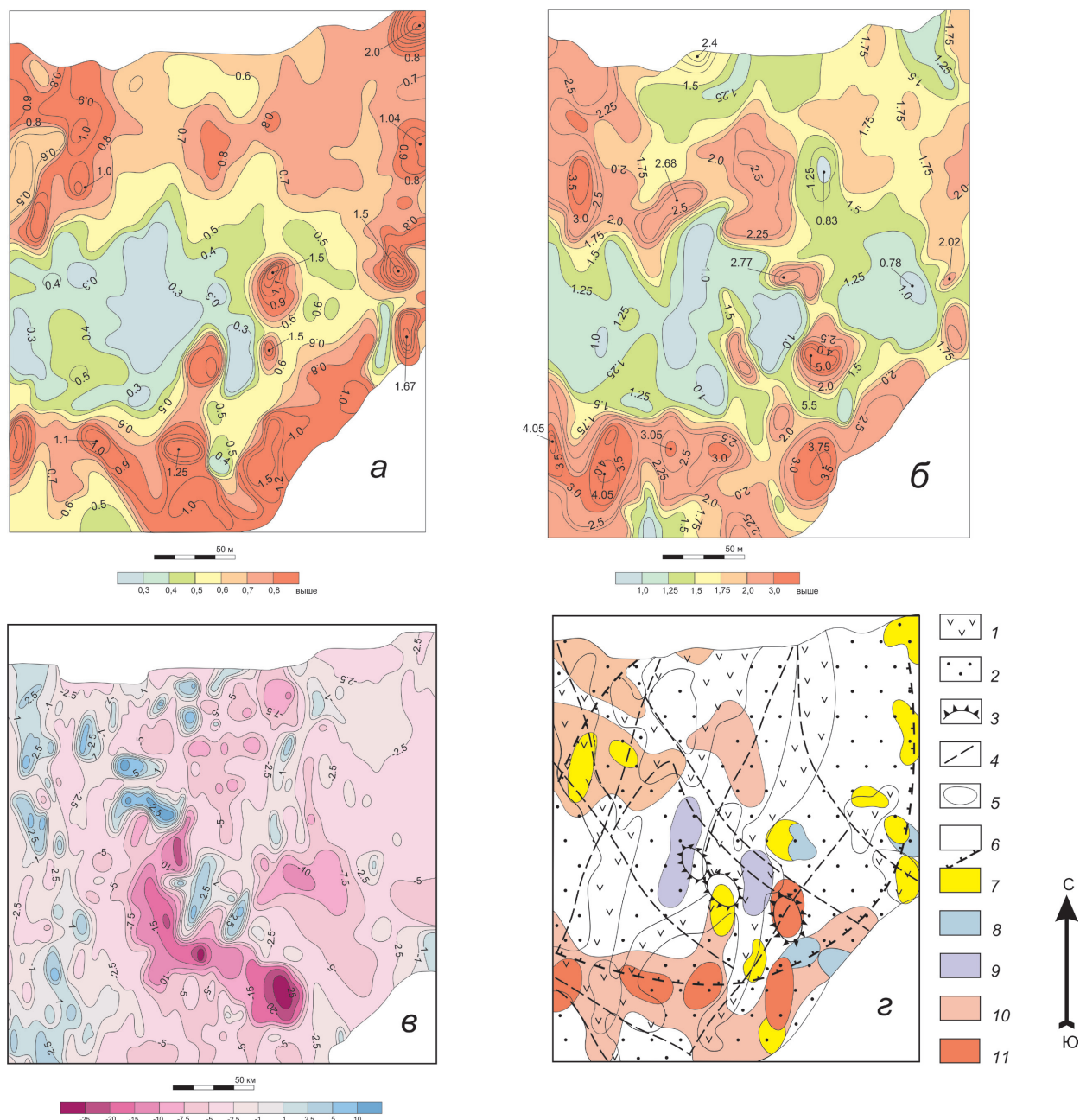


Рис. 4. Геолого-геофизические материалы по ВТС гора Широкая (о-в Итуруп). *а, б* — карты отношений радиоактивных элементов (в условных единицах): *а* — уран-ториевых, *б* — уран-калиевых; *в* — карта аномального магнитного поля ΔT_a ($n \cdot 10^2$ нТл); *г* — схема интерпретации: 1 — андезиты, лавы среднего состава, 2 — липариты, 3 — взрывные воронки, 4 — разрывные нарушения, 5 — границы комплексов, 6 — контур кальдеры. Ореолы метасоматитов: 7 — кварц-серицитовые породы (серицитолиты), 8 — пропилиты низкотемпературные, 9 — пропилитоиды средне-высокотемпературные, 10 — вторичные кварциты, кварц-эпидотиты, 11 — аргиллизиты.

Fig. 4. Geological and geophysical data for the Shirokaya Mountain VTS (Iturup Island). *a, б* — maps of radioactive element ratios (in conventional units): *a* — uranium thorium, *б* — uranium potassium; *в* — map of the anomalous magnetic field ΔT_a ($n \cdot 10^2$ nT); *г* — interpretation scheme: 1 — andesites, intermediate composition lavas; 2 — liparites; 3 — explosive craters; 4 — faults; 5 — boundaries of complexes; 6 — caldera outline. Metasomatite haloes: 7 — quartz sericite rocks (sericitolites); 8 — low temperature propylites; 9 — medium to high temperature propylitoids; 10 — secondary quartzites, quartz epidotites; 11 — argillizites.

определения фона (Володькова, 2007). Заметно различие фоновых характеристик кальдеры Медвежьей и Широкой: если по калий-ториевому и уран-калиевому отношениям ЕРЭ различия

составляют не более доверительного интервала Δ , по уран-ториевому отмечаются различия в пределах двух доверительных интервалов. Это соответствует развитию разных систем метасоматоза:

на кальдере Широкой отмечаются низко-средне-температурные метасоматиты коровой природы. Для расчетов их характеристик используются нижние полуоси кривых метасоматоза.

Особенности генезиса кальдеры Широкой способствовали возникновению ярко выраженной в полях отношений ЕРЭ концентрически-зональной гидротермально метасоматической системы, по которой можно определить эпицентр и размеры кальдеры.

Метасоматиты кальдеры (рис. 4) выделяются интенсивными аномалиями отношений ЕРЭ, подчеркивающими концентрически-кольцевую структуру диаметром порядка 15 км с эпицентром гора Широкая. Особенно контрастно выделяется несколько концентрически-кольцевых зон метасоматитов на картах уран-ториевых и уран-калиевых отношений. Рассчитаны надфоновые характеристики ЕРЭ метасоматитов вулcano-тектонической структуры. Широкая, проведена их первичная классификация с учетом работы (Володькова, 2020) (рис. 1) и «генеральной последовательности», что позволило установить природу метасоматитов на этом участке. Выяснилось, что здесь картируются многие типы метасоматоза, описанные на соседней площади ареала вулкана Баранского (Рычагов, 2003). Вероятно, газы выделялись при взрыве на ранних стадиях образования кальдеры Широкой, а гидротермально-метасоматическая система сформирована позднее. Поэтому процессы дегазации слабо влияли на характеристики метасоматоза, которые близки данным по системе вулкана Баранского.

Определить тип метасоматитов довольно легко, но часто по характеристикам аномалий отношений ЕРЭ они значительно отличаются от данных эталонной таблицы (Володькова, 2020), в связи с низкой степенью проявленности процессов метасоматоза. На участке кальдера Широкая, сравнительно с данными по метасоматозу вулканов системы Баранского (Рычагов, 2003), шире представлены продукты кислотного выщелачивания (аргиллизиты, вторичные кварциты). Степень изменения этих ассоциаций, по-видимому, велика; они образуют контрастные аномалии и зоны; в пределах доверительного интервала их характеристики очень близки к эталонным (табл. 3; рис. 1, 4). Присутствие пропилитов и слюдястых пород очевидно, но их параметры определить сложнее из-за слабого распространения и меньшей степени изменения. Пропилиты преобладают в центре структуры, в эпицентре их температура максимальна. С учетом значений аномалий отношений ЕРЭ, пропилитоиды эпицентра, вероятно, близки к средне-высокотемпературным II–III подгруппы в Основной таблице (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате картирования на основе аэро-геофизических данных масштаба 1:50000 кальдер Медвежья и Широкая на о. Итуруп была опробована методика выделения ареалов региональных метасоматитов. С использованием характеристик магнитного поля и надфоновых аномалий отношений ЕРЭ созданы непротиворечивые модели развития таких гидротермально-

Таблица 3. Экстремальные значения аномалий отношений ЕРЭ метасоматитов горы Широкой

Table 3. Extreme values of anomalies in the NRE ratios of the Mountain Shirokaya metasomatites

№	Тип метасоматоза	Значения отношений ЕРЭ			Значения надфоновых аномалий ЕРЭ			Температура T*		pH
		U/Th	K/Th	U/K	δU/Th	δK/Th	δU/K	T ₁	T ₂	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Аргиллизиты	1.50	0.20–0.30	5.50	9.5	-1 -2	16.0	100–200	50–300	2–5
2	Вторичные кварциты, кварц-эпидозиты	0.85	0.20	4.00	3.0	-2.0	10.0	350–470	300–500	1–4
3	Кварц-серицитовые породы (серицитолиты?)	1.50	0.60	2.45	9.5	2.0	3.80	300–350	200–400	4–5
4	Пропилиты низкотемпературные	1.0	0.89	1.2–1.0	4.5	4.9	-1.2–2.0	180–300	150–350	4.5–6.5
5	Пропилитоиды средне-высокотемпературные?	0.30	0.40	0.75	-2.5	0.0	-3.0	Более 300–350	250–500	3.5–6.5

Примечание. Температура процессов метасоматоза T₁ (графа 9) определяется на основе данных С.Н. Рычагова (2003). Значения температуры T₂ и pH (графы 10–11) скорректированы с учетом данных Бардиной и Петрова (Юричев, 2015).

Note. The temperature of metasomatism processes T₁ (column 9) is determined based on data from S.N. Rychagov (2003). The values of temperature T₂ and pH (columns 10–11) are adjusted to account for data of Bardina and Petrov (Yurichev, 2015).

метасоматических систем. В оптимальных случаях (широкая проявленность метасоматоза определенного типа, хорошая геолого-геохимическая изученность с определением температур и значений водородного показателя) можно однозначно определить тип метасоматоза по «Основной таблице» Е.В. Плющева с соавторами (1985; 2012). Получены новые данные по параметрам метасоматитов, полностью соответствующие «генеральной последовательности» во всем диапазоне температур, от низко-среднетемпературных до высокотемпературных (мантийной природы). В ряде случаев они практически идентичны эталонным характеристикам (Володькова, 2020).

Таким образом, по нашему мнению, основы существования «генеральной последовательности» и возможность использования для картирования метасоматитов данных по вулканам о. Итуруп доказаны. Для полного доказательства регулярности (равномерного изменения значений надфоновых аномалий отношений ЕРЭ) не хватает экспериментальных данных.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам и ответственному секретарю журнала к.т.н. В.А. Рашидову.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТиГ ДВО РАН (тема НИР № 126020216322-5).

Список литературы [References]

- Алексеев В.И.* Минеральный состав биотититов и цвиттеров Тихоокеанского оловорудного пояса / Под ред. Ю.Б. Марина. С-Пб.: Российское минералогическое общество, 2012. Т. 1. С. 9–11 [*Alekseev V.I.* Mineralnii sostav biotititov i tsvitterov Tihooceanskogo olovorudnogo poajsa / Ed. Yu.B. Marin. Sankt Petersburg: Rossijskoe mineralogicheskoe obshchestvo., 2012. V. 1. P. 9–11 (in Russian)].
- Анфилов В.Н.* Происхождение андезитов и риолитов комплементарных магматических серий // Литосфера. 2010. № 1. С. 37–46 [*Anfilogov V.N.* Proishozhdenie andezitov i riolitov komplementarnykh magmaticheskikh serij // Litosfera. 2010. № 1. P. 37–46 (in Russian)].
- Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, МАИК, 2000. 363 с. [*Ariskin A.A., Barmina G.S.* Modelirovanie fazovykh ravnovesiy pri kristallizatshii basaltovykh magm. Moscow: Nauka, MAIK, 2000. 363 p. (in Russian)].
- Бессонова Е.П.* Моделирование динамики тепломассопереноса и физико-химических процессов в гидротермальной системе в. Эбеко (Курильские острова). Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 2004. 22 с. [*Bessonova E.P.* Modelirovanie dinamiki teplomassoperenosa i phisiko-himicheskikh protsessov v gidrotermalnoy sisteme v. Ebeko (Kurilskie ostrova). Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Novosibirsk: Objed. in-t geologii, geophysiki i mineralogii SO RAN, 2004. 22 p. (in Russian)].
- Бочарников Р.Е.* Физико-химические аспекты магматической дегазации на вулкане Кудрявый, Курильские острова. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук, М.: МГУ им. Ломоносова, 2002. 20 с. [*Bocharnikov R.E.* Phisiko-himicheskie aspekty magmaticheskoy degazatsii na vulkane Kudrayviy, Kurilskie ostrova. Aftoref. diss. kand. geol.-min. nauk, Moscow: MGU im. Lomonosova, 2002. 20 p. (in Russian)].
- Бочарников Р.Е., Князик В.А., Штейнберг А.С. и др.* Эмиссия газов рудных и петрогенных элементов на вулкане Кудрявый, остров Итуруп, Курильские острова // ДАН. 1998. Т. 361. № 5. С. 671–675 [*Bocharnikov R.E., Knajzik V.A., Shtejnberg A.S. et al.* Emission of gase, ore and petrogenetic elements from Kudrayviy volcano, Iturup Island, Kurile Island // DAN. 1998. V. 361. № 5. P. 671–675 (in Russian)].
- Витухин Д.И., Орешкина Т.В., Пушаровский Ю.М. и др.* Новые данные по геологии острова Итуруп (Курильская островная дуга) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1996. Т. 4. № 6. С. 61–74 [*Vitukhin D.I., Oreshkina T.V., Pushcharovskii Yu.M., Tsukanov N.V.* New Data on the Geology of Iturup Island (Kuril Island Arc) // Stratigraphy and Geological Correlation. 1996. V. 4. № 6. P. 580–593].
- Володькова Т.В.* Особенности магматизма острова Кунашир (Курильская островная дуга) по аэрогеофизическим данным // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 6. С. 15–36 [*Volodkova T.V.* Magmatism of Kunashir Island (Kuril Island Arc) from aerogeophysical Evidence // Russian Journal of Pacific Geology. 2007. V. 1. № 6. P. 515–536].
- Володькова Т.В.* Температура, водородный показатель и аномалии отношений радиоактивных элементов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 4. Вып. № 48. С. 85–100 [*Volodkova T.V.* Temperature, ph indicator and the anomalies of the natural radioactive element ratios of metasomatites in Priamurye // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2020. V. № 4(48). P. 85–100 (in Russian)].
- Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop) // Тез. докл. Матер. конф. с междунар. уч. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. 171 с. [Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2021) // Tes. dokl. Mater. konf. s meghdunar. uch. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IViS DVO RAN, 2021. 171 p. (in Russian)].
- Глубинный магматизм, его источники и плюмы // Тр. XV Междунар. семинара. Институт геохимии СО РАН, Симферополь, Иркутск: изд-во Института геохимии СО РАН, 2019. с. [Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Proceedings in Earth and Environmental Sciences (SPEES). 2019. 262 p. (in Russian)].
- Голубев В.С.* Динамика геохимических процессов. М.: Недра. 1972. 239 с. [*Golubev V.S.* Dinamika geohimicheskikh protsessov. Moscow: Nedra, 1972. 239 p. (in Russian)].
- Голубев В.С., Шарапов В.Н.* Динамика эндогенного рудообразования. М.: Недра, 1984. 280 с. [*Golubev V.S., Sharapov V.N.* Dinamika endogennogo rudoobrazovaniya. Moscow: Nedra, 1984. 280 p. (in Russian)].

- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 267 с. [Gorshkov G.S. Volcanism and the Upper Mantle New York-London: Plenum press, 1970. 380 p.].
- Дворник Г.П. Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минерогения // Известия Уральского ГГУ. 2020. Вып.1 (57). С. 63–72. <https://doi.org/1021440/2307-209-2020-1-63-72> [Dvornik G.P. Types of metasomatic rocks: temperature conditions, building, features of composition, minerageny // Ivestiya UGGP, 2020. Vol 1 (57). P. 63–72 (in Russian)].
- Зарайский Г.П. Эксперимент в решении проблем метасоматизма / Под ред. Л.Я. Арановича, Н.С. Бортникова. М.: ГЕОС, 2007. 136 с. [Zarayskiy G.P. Experiment v reshenii problem metasomatizma / Ed. L.Ya.Aranovich, N.S. Bortnikov. Moscow: GEOS, 2007. 136 p. (in Russian)].
- Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В. и др. Береговые термальные источники центральной части о. Итуруп: макро-и микроэлементные составы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 3. Вып. 55. С. 31–44. <https://doi.org/1031431/1816-5524-2022-3-55-31-44> [Kalacheva E.G., Kotenko T.A., Voloshina E.V. et al. Coastal thermal springs of the central part of Iturup Island: macro and microelements composition // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2022. № 3(55). P. 31–44 (in Russian)].
- Кац Я.Г., Рябухин А.Г. Космическая геология. М.: Просвещение, 1984. 80 с. [Kats Ya. G., Ryabuhin A.G. Kosmicheskaya geologiya. Moscow: Prosveschenie, 1984. 80 p. (in Russian)].
- Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю. и др. Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных // Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90 [Kirsanov A.A., Lipiyaynen K.L., Smirnov M.Yu. et al. Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing. Regional Geology and Metallogeny. 2019. № 78. P. 82–90 (in Russian)].
- Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Смирнов М.Ю. и др. Локализация зон гидротермально-метасоматических пород с использованием методов спектрального анализа гиперспектральных космических снимков (на примере золоторудных объектов Улинского прогиба, Хабаровский край) // Региональная геология и металлогения. 2022. № 89. С. 68–76 [Kirsanov A.A., Lipiyainen, Smirnov et al. Localization of zones of hydrothermal-metasomatic rocks using methods of spectral analysis of hyperspectral satellite images: Case study of gold targets in the Ulinsky Trough, Khabarovsk Territory // Regional Geology and Metallogeny. 2022. № 89. С. 68–76 (in Russian)].
- Козлов Е.Н., Арзамасцев А.А. Петрогенезис метасоматитов зон фенитизации щелочно-ультраосновного комплекса Озерная Варакка // Петрология. 2015. Т. 23. № 1. С. 50–74 [Kozlov E.N., Arzamashev A.A. Petrogenesis of metasomatic rocks in the fenitized zones of the Ozeraya Varaka alkaline ultrabasic complex, Kola Peninsula [Petrology. 2015. V. 23. Iss. 1. P. 45–67].
- Козлов Е.Н., Арзамасцев А.А., Базай А.В. Типохимизм минералов из пород контактовых ореолов щелочно-ультраосновных комплексов как индикатор полиметасоматической переработки: на примере массива Озерная Варакка (Кольский полуостров) // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 2. С. 286–303 [Kozlov E.N., Arzamashev A.A., Bazai A.V. Typochemistry of the minerals in the contact aureole rocks of the alkaline-ultrabasic complexes as an indicator of a polymetasomatic alteration: Case study of the Ozeraya Varaka massif (the Cola Peninsula) // Vestnik MGTU. 2014. V. 17. № 2. P. 286–303 (in Russian)].
- Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг). М.: Наука, 1983. 212 с. [Kononov V.I. Geochemistry of thermal Waters in the recent volcanic Areas (rifting Zones and Islands Arcs). Moscow: Nauka, 1983. 212 p. (in Russian)].
- Копылов М.И., Плотницкий Ю.Е., Родионов С.М. и др. Хингано-Олонойский оловорудный район: геолого-геофизические характеристики, рудность, проблемы развития сырьевой базы. Владивосток-Хабаровск: ДВО РАН, 2004. 252 с. [Kopylov M.I., Plotnitskiy Yu. E., Rodionov S. M. et al. The Hingan-Olonoy tin-ore Region: Geological-geophysical Characteristics, ore Content, Problems of developing the mineral Base. Vladivostok-Khabarovsk: FEB RAS, 2004. 252 p. (in Russian)].
- Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 112 с. [Korzhinsky D.S. Theory of Metasomatic Zoning. Oxford: Clarendon Press, 1970. 162 p.].
- Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 288 с. [Korzhinsky D.S. Physicochemical Basis of the Analysis of the Paragenesis of Minerals. Translated from the Russian. New York: Consultants Bureau, inc., 1959. 142 p.].
- Коржинский Д.С. (под ред. Жарикова В.А.). Основы метасоматизма и метамагматизма: Избранные труды. М.: Наука, 1993. 239 с. [Korzhinsky D.S. (pod red. Zharikova V.A.). Osnovy metasomatizma i metamagmatizma: Izbrannye Trudy. Moscow: Nauka, 1993. 239 p. (in Russian)].
- Коростылев П.Г., Гонеvчук В.Г., Гонеvчук Г.А. и др. Хинганское оловорудное месторождение // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Кн. 2 / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 661–667 [Korostylev P.G., Gonevchuk V.G., Gonevchuk V.A. Hinganskoe olovorudnoe mestoroghdenie // Geodinamika, magmatism i metallogeniya Vostoka Rossii. B. 2 / Ed A.I. Hanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. P. 661–667 (in Russian)].
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 831 с. [Korn G.A., Korn T.M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. New York-San Francisco-Toronto-London-Sydney, 1968. 878 p.].
- Кузьмин Д.В., Низаметдинов И.Р., Смирнов С.З. и др. Магнезиальные базальты кальдеры Медвежья: основные магмы и их источники на примере

- вулкана Меньший Брат (остров Итуруп) // Петрология. 2023. Т. 1. № 3. С. 238–263. <https://doi.org/10.31857/50689590323030068> [Kuzmin D.V., Nizametdinov I.R., Smirnov S.Z. et al. Magnesian basalts of the Medvezhia caldera: dominant magmas and their sources, as exemplified by Menshiy Brat volcano, Iturup island, Kuriles // Petrology. 2023. V. 31. № 3. P. 279–303. <https://doi.org/10.1134/s0869591123030062>].
- Мартынов Ю.А. Основы магматической геохимии. Владивосток: Дальнаука, ДВГИ ДВО РАН, 2010. 228 с. [Martynov Yu.A. Osnovy magmaticheskoy geohimii. Vladivostok: Dalnauka, DVGI DVO RAN. 2010. 228 p. (in Russian)].
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.С., Кимура Дж. Геохимия и петрогенезис вулканических пород Курильских островов // Петрология. 2010. Т. 18. № 5. С. 1–25 [Martynov Yu. A., Khanchuk A.I., Kimura J.-I et al. Geoghemistry and petrogenesis of volcanic Rocks in the Kuril Island Arc // Petrology. 2010. V. 18. № 5. P. 489–513. <https://doi.org/10.1134/S0869591110050048>].
- Метасоматизм и метасоматические породы / под ред. Жариков В.А., Русинов В.Л. М.: Научный мир, 1998. 492 с. [Metasomatizm i metasomaticheskie породы / pod red. Zharikov V.A., Rusinov V.L. Moscow: Nauchyi mir, 1998. 492 p. (in Russian)].
- Минина О.В., Мигачев И.Ф., Звездов В.С. Прогнозно-металлогеническое районирование южной части Дальневосточного региона на медно-порфировое оруденение // Отечественная геология. 2019. № 1. С. 35–45. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10005> [Minina O.V., Migachev I.F., Zvezdov V.S. Prognozno-metallogenicheskoe rajonirovanie yuzhnoy chasti Dalnevostochnogo regiona na medno-porfirovye orudenenie // Otechestvennaya geologiya. 2019. № 1. P. 35–45 (in Russian)].
- Мотов А.П., Валеев О.К., Малах Ю.Е. Новые цели спектрального дистанционного зондирования рудоносных гидротермально измененных пород // Тез. докл. Матер. Второй Междунар конф. Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов. СПб.: ФГУП ВСЕГЕИ, 2014. С. 14–24 [Motov A.P., Valeev O.K., Malah Yu. E. Novye tseli spektralnogo distantsionnogo zondirovaniya rudonosnyh gidrotermalno-izmenennyh porod // Tez. dokl. Mater. Vtoroj Mezhdunar. konf. Novye tehnologii obrabotki i ispolzovaniya dannyh distantsionnogo zondirovaniya Zemli v geologorazvedochnykh rabotah i pri vedenii monitoringa opasnyh geologicheskikh protsessov. SPb.: FGUP VSEGEI, 2014. P. 14–24 (in Russian)].
- Низаметдинов И.Р. Петрогенезис посткальдерных вулканитов кальдеры Медвежья на примере вулкана Меньший Брат, о. Итуруп. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2022. 23 с. [Nizametdinov I.R. Petrogenesis postkaldernykh vulkanitov kaljdery Medvezhija na primere vulkana Menjshiy Brat, o. Iturup. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Novosibirsk: IGM SO RAN, 2022. 23 p. (in Russian)].
- Петров О.В., Киселев Е.А., Шпикерман В.И. и др. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулcano-плутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 50–74 [Petrov O.V., Kiselev E.A., Shpikerman V.I. et al. Anticipating the distribution of gold-copper-porphyry-type deposits in volcanic-plutonic belts of Russia's eastern regions based on results of compiling sheets of the State Geological Map-1000/3 // Regional Geology and Metallogeny. 2019. № 80. P. 50–74 (in Russian)].
- Плющев Е.В., Шатов В.В. / под ред. Ю.Б. Марин. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1985. 247 с. [Plyushev E.V., Shatov V.V./ pod red. Yu. B. Marin. Geohimiya i rudonosnostj gidrotermalno-metasomaticheskikh obrazovanij. Leningrad: Nedra, 1985. 247 p. (in Russian)].
- Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. Тр. ВСЕГЕИ. Новая серия. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. Т. 354. 560 с. [Plyushev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V. Metallogeniya gidrotermalno-metasomaticheskikh obrazovanij. Tr. VSEGEI, 2012. V. 354. 560 p. (in Russian)].
- Пономарев Г.П., Рашидов В.А., Чубурков Ю.Т. и др. Оценка содержаний изотопов технеция и цезия и изотопных составов породообразующих элементов в возгонах вулкана Кудрявый (Курильские острова) // Геодинамика, магматизм и минерогения континентальных окраин севера Пацифики. (Матер. Всеросс. XII годичного собрания Северо-Вост. отд. ВМО). Магадан.: 2003. 200 с. [Ponomarev G.P., Rashidov V.A., Chuburkov Yu.T. et al. Otsenka soderzhaniy izotopov tehnetsiya i tseziya i izotopnyh sostavov porodooobrazuyuschih elementov v vozgonah vulkana Kudryavy (Kuriljskie ostrova) // Geodinamika, magmatizm i minerageniya kontinentalnyh okrain severa Patsifiki. (Mater. Vseross. XII godichnogo sobraniya Severo-Vost. otd. VMO). Magadan: 2003. 200 p. (in Russian)].
- Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов / под ред. Талавина И.В. и др. // Тез. докл. Матер. Всеросс. конф. с междунар. участием. Первые научные чтения памяти профессора В.Г. Лазаренкова. СПб.: СПбГУ, 2016. 184 с. [Problemy geologii i ekspluatatsii mestorozhdeniy platinovyh metallov / pod red. Talavina I.V. i dr. // Tez. Dokl. Mater. Vseross. konf. s mezhdunar. uch. Pervye nauch. chteniya pamyati prof. V.G. Lazarenkova. SanctPeterburg: SpbGU, 2016. 184 p. (in Russian)].
- Родионов С.М. Медно-порфировое месторождение Ночное // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Кн. 2 / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 583–981 [Rodionov S.M. Medno-porfirovye mestorozhdenie Nochnoe // Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. Kn. 2. / pod red. A.N. Hanchuka. Vladivostok.: Dalnauka, 2006. P. 583–981 (in Russian)].
- Рыбин А.В., Чибисова М.В., Смирнов С.З. и др. Петрохимические особенности вулканических комплексов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 377–385. <https://doi.org/10.26907/2542-2869.2018.2.4.377-385>

- org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.377-385 [Rybin A.V., Chibisova M.V., Smirnov S.Z., Martynov Yu.A., Degterev A.V. Petrochemical Features of volcanic Complexes of Medvezhya Caldera (Iturup Island, Kuril Island) // Geosystems of Transition Zones. 2018. V. 2. № 4. P. 377–385 (in Russian)].
- Рычагов С.Н. Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг. Автореф. дисс. доктора геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский ИВиС ДВО РАН, 2003. 50 с. [Rychagov S.N. Evolutsiya gidrotermalno-magmaticheskikh system ostrovnykh dug. Avtoref. diss. doktora geol.-min. nauk. IViS DVO RAN: Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2003. 50 p. (in Russian)].
- Рычагов С.Н., Степанов И.И. Гидротермальная система вулкана Баранского, о-в Итуруп: особенности поведения ртути в недрах // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 41–52 [Rychagov S.N., Stepanov I.I. Hydrothermal System of Baransky Volcano, Iturup Island: Peculiarities of Hg Behavior in its Interior // Volcanology and Seismology. 1994. № 2. p. 41–52 (in Russian)].
- Савватенков В.М., Мочалов А.Г. Новые геохимические и изотопные (Rb-Sr и Sm-Nd) данные пород щелочного ультраосновного массива Кондер Алданского щита (Хабаровский край, Россия) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 568–590. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.402> [Savatenkov V.M., Mochalov A.G. New geochemical and isotope (Rb-Sr and Sm-Nd) Data for the Rocks of the alkali-ultramafic Konder Massif of the Aldan Shield (Khabarovsk Territory, Russia) // Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle. 2022. V. 67. № 4. P. 568–590 (in Russian)].
- Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н. и др. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вмещающих пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 52–69 [Smirnov S.Z., Rybin A.V., Sokolova E.N. et al. Felsic magmas of the caldera-forming Eruption on the Iturup Island: the first Results of studies of melt Inclusions in Phenocrysts from Pumices of the Lvinaya Past and Vetrovoy Isthmus Calderas // Russian Journal of Pacific Geology. 2017. V. 11. Iss. 1. P. 46–63].
- Топчиева О.М., Петровский В.А., Сухарев А.Е. Условия образования минеральных включений в гидротермальных метасоматитах г. Двугорбой, Южная Камчатка // Вестник Пермского Университета. Геология. 2018. Т. 17. № 1. С. 1–10 [Topchieva O.M., Petrovsky V.A., Sukharev A.E. The Conditions for the Formation of Mineral inclusions in Hydrothermal Metasomatites of the Dvugorbaya Mountain, Southern Kamchatka // Vestnik Permskogo Universiteta. Geology. 2018. V. 17. № 1. P. 1–10 (in Russian)].
- Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д. и др. Состав и условия формирования титаномagnetит-ильменитового оруденения в двупироксеновом габбро Медвежьего месторождения (Южный Урал). II. Стадийность рудообразования как результат эволюции рудоносного раствора // Литосфера. 2016. № 2. С. 48–69 [Holodnov V.V., Shagalov E.S., Bocharnikova T.D. Composition and Conditions of ilmenite and titanomagnetite ore Formation in two-pyroxene gabbro of Medvedevskoe Deposit (Southern Urals). II. Staging of the ore Genesis as Result of Evolution of ore-bearing Melt // Litosphere. 2016. № 2. P. 48–69 (in Russian)].
- Чаплыгин И.В. Рудная минерализация высоко-температурных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва). Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2009. 26 с. (in Russian) [Chaplygin I.V. Rudnaya mineralizatsiya vysokotemperaturnykh fumarole vulkana Kudryaviy (o. Iturup, Kurilskie o-va). Moscow: IGEM, 2009. 26 c. (in Russian)].
- Чибисова М.В., Рыбин А.В., Мартынов Ю.А. и др. Химический состав и минералогия базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 178–186 [Chibisova M.V., Rybin A.V., Martynov Yu.A. et al. Chemical Composition and Mineralogy of Basalts from Menshii Brat Volcano (Iturup, the Kuril Islands) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2009. № 1(13). P. 178–186 (in Russian)].
- Чекишева Т.А., Корольков А.Т. Минералогический анализ платиноидов массива Кондер // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2013. Т. 6. № 1. С. 198–205 [Chekisheva T.A., Korol'kov A.T. Mineralogicheskii analiz platinoidov massiva Konder // Izvestiya Irkutskogo gos. un-ta. Ser. Nauki o Zemle. 2013. T. 6. № 1. P. 198–205 (in Russian)].
- Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения / под ред. В.Н. Шарапова). Новосибирск: Академическое издательство ГЕО, 2010. 287 с. [Chudnenko K.V. Thermodynamic Modelling in geochemistry: the Theory, Algorithms, the Software, Applications / Ed. V.N. Sharapov. Novosibirsk: Akad. izd-vo GEO, 2010. 287 p. (in Russian)].
- Шакиров Р.Б. Особенности химического и изотопного состава углеводородных газов вулканов Менделеева и Головнина (о. Кунашир) // Геохимия. 2014. № 3. С. 267–279. <https://doi.org/10.7868/S001675-500116752514010063> [Shakirov R.V. Chemical and isotopic Characteristics of hydrocarbon Gases from Mendeleev and Golovnin Volcanoes, Kunashir Island // Geochemistry International. 2014. V. 52. № 3 P. 247–259.
- Шарапов В.Н., Лапухов А.С., Гузман Б.В., Черепанова В.К. Динамика фазовых границ в магматогенном флюиде при формировании золото-серебряных месторождений Южной Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1095–1115 [Sharapov V.N., Lapukhov A.S., Guzman B.V., Gherepanova V.K. Dynamics of phase Fronts in magmatic Fluid in the Formation of gold and silver Deposits in Southern Kamchatka // Russian Geology and Geophysics. 2012. Novosibirsk: V. 53. № 9. P. 837–852 (in Russian)].
- Шевко Е.П. Физико-химическая модель формирования активных газогидротерм Камчатки и Курильских островов. Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. Томск: ТГУ, 2018. 209 с. [Shevko E.P. Phisiko-himicheskaya model formirovaniya aktivnykh gazogidroterm Kamchatki i Kurilskih ostrovov. Avtoref.

- dss. dokt. geol.-min. nauk. Tomsk: TGU, 2018. 209 p. (in Russian)].
- Шестернева И.Н.* Гидротермально измененные породы Ханганского оловорудного месторождения и их поисковое значение. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Хабаровск: ДВИМС, 1986. 211 с. [*Shesterneva I. N.* Gidrotermalno izmenennyye porody Chinganskogo olovorudnogo mestorozhdeniya i ih poiskovoe znachenie. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Habarovsk: DVIMS, 1986. 211 p. (in Russian)].
- Юричев А.Н.* Метасоматизм (основные аспекты), учеб. пособие // Томск: Издательский Дом ТГУ, 2015. 116 с. [*Yurichev A.N.* Metasomatizm (osnovnye aspekty), ucheb. posobie // Tomsk: Izdat. Dom TGU, 2015. 116 p. (in Russian)].
- Yamaguchi Ya., Kahle A.B., Tsu H. et al.* Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. № 4. P. 1062–1071.

CHARACTERISTICS OF ANOMALIES IN THE RATIOS OF NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE ELEMENTS (NRE) IN METASOMATITES OF VOLCANOES ON ITURUP ISLAND (KURIL ISLANDS). PART 1. EVIDENCE FOR THE EXISTENCE OF A «GENERAL SEQUENCE»

T.V. Volod'kova

Yu.A. Kosygin Institute of tectonics and geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia, 680000

Received April 04, 2025; revised September 04, 2026; accepted September 25, 2026

The values of background-exceeding anomalies in the ratios of naturally occurring radioactive elements (NRE), temperature, and pH of various types of metasomatites are unambiguously related by the metasomatism equation. It is hypothesized that, on a graph of the metasomatism equation, the plotted points representing these characteristics approximately form a «general sequence». The «general sequence» defines a regular change in the type of metasomatism as temperature and hydrogen index increase. Proving the validity of this proposition is the main objective of this study. There is insufficient experimental data to evaluate all types of metasomatites — propylites and feldspar-containing complexis are poorly characterized. A methodology has been developed to obtain such data in the volcanic and magmatic systems of Iturup island (Kuril Islands), where the metasomatites of the classical propylite formation are especially widespread. In the study of hydrothermal-metasomatic systems in volcanoes, values of above-background anomalies in REE ratios characteristic of areas of regional infiltration metasomatism were determined. Additionally, temperature values and, rarely, hydrogen index data were used. This allows for the derivation of an overdetermined system of equations and increases the reliability of the solution. Statistical characteristics of individual types of metasomatism have been calculated, refining the «general sequence».

Keywords: radioactive element ratio anomalies, aeromagnetometry, metasomatites.