

УДК 551.441.(571.65)

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЭПИТЕРМАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ КЫПЛАТАПСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЛЯ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧУКОТКА)

© 2023 г. А. В. Волков^а, *, А. Г. Пилицын^б, **, В. Ю. Прокофьев^а,
А. А. Долманова-Тополь^а, К. Ю. Мурашов^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^бИнститут минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, ул. Вересаева, 15, Москва, 121357 Россия

*e-mail: tma2105@mail.ru

**e-mail: allexpil@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 10.04.2023 г.

В статье рассмотрены условия образования существенно-серебряной минерализации Кыплатапского вулканического поля (КВП), Чаунской зоны, Центрально-Чукотского сектора, Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Приведены новые данные по составу, распределению и содержаниям микроэлементов, включая РЗЭ, в рудоносных метасоматитах. Заметное обогащение изученных образцов РЗЭ, преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, очень низкие Eu/Sm отношения (≤ 1), слабо наклонные близондритовые спектры с явными европиевыми минимумами — типичны для эпитеpмальной рудообразующей системы КВП. Значения Ce/Ce* варьируют от слабо отрицательных до умеренно положительных значений (от 0.81 до 1.38), а значения Eu/Eu* изменяются от 0.28 до 0.7. Такое сочетание Ce/Ce* и Eu/Eu* указывает на окислительные условия, преобладавшие при рудообразовании. Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце позволили установить, что рудообразующий флюид содержал хлориды Na, Mg и K, эпитеpмальная минерализация отлагалась гомогенными гидротермальными флюидами с концентрациями солей (0.3–6.2 мас. %-экв. NaCl), плотность флюида — 0.60–0.87 г/см³, при температурах от 203 до 343°C, давление водяного пара изменялось от 40 до 140 бар. Полученные геохимические и термометрические данные, подтверждают выдвинутое ранее предположение — о принадлежности изученной минерализации КВП к промежуточно сульфидизированному (intermediate sulfidation) эпитеpмальному классу. Эти данные, указывают на андезитовые магмы и метеорные воды как наиболее вероятные источники флюидов. Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки эпитеpмальных Au–Ag месторождений.

Ключевые слова: ОЧВП, Центральная Чукотка, Кыплатап, вулканическое поле, микроэлементы, РЗЭ, флюидные включения, условия рудообразования

DOI: 10.31857/S0203030623700232, **EDN:** WQZMFP

ВВЕДЕНИЕ

В 1990-х годах прошлого века геологами Чаунской геологоразведочной экспедиции в КВП было открыто перспективное на Au и Ag Кыплатапское рудное поле, которое находится на территории Чаунского района Чукотского автономного округа в Арктической зоне России, в 270 км к северо-востоку от районного центра — г. Певек (рис. 1). Рудное поле находится недалеко (8–15 км) от круглогодичной автодороги Певек—Билибино и ЛЭП 110 кВ (35 км), что существенно облегчает проведение в его пределах геологоразведочных работ.

Результаты изучения геологии, вещественного состава и геохимических особенностей руд КВП были недавно опубликованы [Пилицын и др., 2022, 2023]. Однако, типизация рудопроявления окончательно не была определена. Результаты изучения геолого-структурных и минералогических особенностей указывали на принадлежность минерализации рудопроявления Кыплатап к высокосульфидизированному эпитеpмальному классу [Пилицын и др., 2022], в то время как геохимические особенности корреспондировали с промежуточно-сульфидизированным классом [Пилицын и др., 2023].

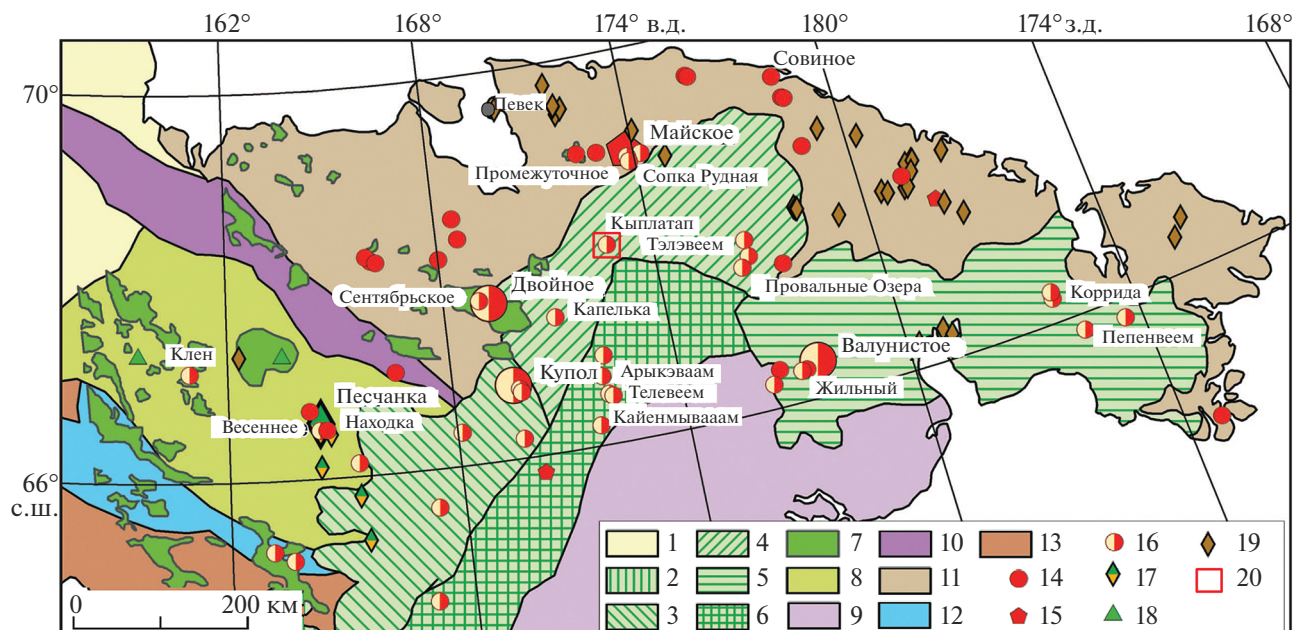


Рис. 1. Вулканические пояса и Au–Ag эпитермальные месторождения Чукотки. Схема составлена с использованием материалов [Белый, 1994; Соколов и др., 1999; Тихомиров и др., 2017].

1 – кайнозойский чехол; 2–6 – Охотско-Чукотский вулканический пояс (ОЧВП): 2–4 – секторы ОЧВП (2 – Пенжинский, 3 – Анадырский, 4 – Центральнo-Чукотский), 5 – Восточно-Чукотская фланговая зона, 6 – внутренняя зона ОЧВП; 7 – раннемеловые вулканические впадины; 8 – Олойский вулканический пояс; 9 – Корьякско-Камчатская складчатая система; 10 – Южно-Ануйская сутура; 11 – Чукотская складчатая система; 12 – палеозойско-мезозойские островодужные комплексы; 13 – деформированные палеозойско-мезозойские комплексы чехла Омолонского массива; 14–19 – месторождения (большие значки – крупные, маленькие – средние и мелкие объекты): 14 – золото-кварцевые жильные, 15 – золото-сульфидные (вкрапленные), 16 – эпитермальные золото-серебряные, 17 – медно-молибден-порфировые, золото- и серебросодержащие, 18 – колчеданно-полиметаллические в вулканических породах, 19 – оловорудные; 20 – Кыплатапское рудное поле.

В связи с этим, главная цель настоящей статьи – изучение условий образования эпитермальной минерализации рудопроявления Кыплатап, определение ее генетической принадлежности; в выделении на этой основе новых и уточнении известных критериев оценки промышленной значимости этого рудопроявления. Следует отметить, что в данной работе впервые приведены результаты микротермометрических исследований флюидных включений в рудоносном кварце рудопроявления.

Известно, что микроэлементы и РЗЭ активно реагируют на окислительно-восстановительную среду природных обстановок, что позволяет использовать их в качестве геохимических индикаторов источников вещества. Следует отметить, что информация о составе и распределении микроэлементов и РЗЭ параметры рудообразующих флюидов для эпитермальной существенно серебряной минерализации во вторичных кварцитах КВП получена впервые.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2021–2022 гг. коллекция образцов КВП была изучена в ИГЕМ РАН с применением современ-

ных прецизионных методов анализа минерального вещества. Определение концентрации породообразующих и отдельных примесных элементов образцов вмещающих пород и руд КВП выполнено методом рентгенфлуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре модель Axios mAX производства компании PANalytical в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН. Измерения микроэлементов (ICP-MS) проводили на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связанной плазме X-Series II. Пределы обнаружения элементов составляли от 0.1 нг/г для тяжелых и средних по массе элементов с возрастанием до 1 нг/г для легких элементов. Для оценки условий формирования вулканогенного оруденения были определены геохимические показатели, а также отношения между элементами: ΣREE , ΣLREE , ΣHREE , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$, Hf/Sm, Nb/La, Th/La, Y/No, U/Th, Co/Ni, δEu , δCe , и др. Показатели рассчитаны по усредненным значениям элементов для руд каждого месторождения. Кроме того, рассчитаны коэффициенты обогащения микроэлементов руд и вмещающих пород путем нормирования результатов анализов к результатам средних содержаний микроэлементов в земной коре и хондритах. Полученные значения сведены в таб-

лицы, по которым построены графики распределения РЗЭ и других микроэлементов в рудах месторождений.

Микротермометрическое изучение индивидуальных включений проводилось в лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, состоящего из камеры THMSG 600 фирмы “Linkam” (Англия), установленном на микроскопе “Olimpus BX51” (Япония), видеокамеры и управляющего компьютера. Химический состав флюида, захваченного во включениях, оценивался по результатам измерений фазовых переходов и превращений, происходивших при нагревании и охлаждении препаратов. Точность измерений температуры составляет $\pm 0.2^\circ\text{C}$ в интервале температур от -20 до $+20^\circ\text{C}$ и понижается при более высоких и низких температурах. Состав солей, преобладающих в водных растворах флюидных включений, оценивался по результатам измерения температур плавления эвтектики [Борисенко, 1977]. Суммарная концентрация солей в двухфазовых флюидных включениях оценивалась по температурам плавления льда на основе экспериментальных данных для системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ [Bodnar, Vityk, 1994]. Давление флюида рассчитывалось для гетерогенных флюидов как давление водяного пара. Оценки концентраций солей, плотностей и давлений флюида проводились с использованием программы “FLINCOR” [Brown, 1989].

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Основные элементы строения чукотской части ОЧВП показаны на рис. 1 по В.Ф. Белому [1994]. Внешняя зона ОЧВП в пределах Чукотки разделена на два сектора (см. рис. 1): Анадырский и Центральнo-Чукотский, различающихся по особенностям эволюции магматизма, объемным соотношениям вулканических формаций и строению.

В Центральнo-Чукотском секторе основание вулканических покровов внешней зоны представлено структурами Чукотского складчатого пояса. В этом секторе происходит резкий излом границы внешней и внутренней зон ОЧВП, простираение которого меняется с северо-восточного на юго-восточное направление (см. рис. 1). Развитие Центральнo-Чукотского сектора в отличие от остальных районов начиналось с образования игнимбритовой формации и лишь затем покровов андезитов. В чукотском отрезке ОЧВП известны многочисленные золотосеребряные эпитеpмальные месторождения (см. рис. 1), большинство из которых относятся к низкосульфидизированному классу, селеновому подтипу [Бортников и др., 2022].

Кыплатапское вулканическое поле, приурочено к юго-восточному флангу одноименной интрузивно-купольной структуры (ИКС), осложняющей Паляваам-Пыкарваамскую вулканотектоническую депрессию, входящую в состав Чаунской зоны, Центральнo-Чукотского сектора ОЧВП (см. рис. 1). В плане КВП (площадью 45 км^2) имеет изометричную форму и оконтурено кольцевыми разломами. Сложное блоковое строение КВП, обусловлено сетью пересекающихся разломов субширотного и северо-восточного (субмеридионального) простирания. Кыплатапская ИКС была сформирована в результате внедрения в алькаквуньские вулканы крупного лакколитообразного субвулканического тела, сложенного риолит-трахириолит-трахидитами. Уровень эрозионного среза рудного поля, по геохимическим данным, можно оценить, как верхнерудный [Пилицын и др., 2023].

На площади КВП рудовмещающие вулканы испытали следующие метасоматические преобразования: щелочной метасоматоз — формация фельдшпатофиоров (дорудный этап), кислотный метасоматоз — формация вторичных кварцитов и пострудная пропилитовая. Вторичные кварциты приурочены к зонам разрывных нарушений, трещиноватости и брекчирования. Выделяются серицит-кварцевые, каолинит-серицит-кварцевые и монокварцевые, включая кварц-халцедоновую, ассоциации вторичных кварцитов с постепенными переходами между ними. Наличие в протоловках из рудных тел таких минералов, как корунд и андалузит, позволяет предполагать существование более глубинной (более 1 км) кварц-корунд-андалузитовой фации вторичных кварцитов. Монокварциты слагают внутренние ядерные части вторичных кварцитов. Широко развиты метасоматические жилы, сложенные мелкозернистым или фарфоровидным кварцем, кварц-адуляровым и кварц-халцедоновым агрегатами. Жилы, как правило, приурочены к системам разрывных нарушений, их образование связано с завершающим этапом метасоматоза.

Рудопроявление Кыплатап занимает площадь 3 км^2 и приурочено к узлу пересечения разломов северо-западного, северо-восточного и субширотного направлений. В его пределах выявлены обособленные рудные зоны, разобщенные 100–200 м интервалами слабоминерализованных пород, в пределах которых прослежены 35 потенциальных рудных тел, представленные линейными зонами брекчирования и дробления, сопряженные с кварцевыми прожилково-жилковыми образованиями [Пилицын и др., 2022]. По простиранию линзовидные рудные тела имеют протяженность и мощность до 200 м и 2–5 м соответственно. Содержания Au и Ag достигают 11.8 г/т и 7654.0 г/т соответственно.

Таблица 1. Химический состав изученных образцов КВП (в мас. %)

№ пробы	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S _{общ}	Σ
18-2qj31'	76.62	0.11	13.02	1.29	0.04	0.15	0.03	2.10	3.85	0.02	0.02	97.25
19-2qj31'	74.39	0.10	13.97	1.08	0.02	0.18	0.01	0.14	4.77	0.02	0.01	94.69
20-2qj31'	72.21	0.27	13.84	2.29	0.30	0.19	0.13	1.42	5.98	0.04	0.52	97.19
21-2qj31'	79.38	0.11	11.43	0.59	0.01	0.10	0.00	0.18	5.36	0.00	0.01	97.17
22-2qj31'	81.11	0.10	11.74	0.98	0.02	0.11	0.00	0.10	3.33	0.02	0.00	97.51
Среднее	76.74	0.14	12.8	1.24	0.08	0.14	0.03	0.79	4.66	0.02	0.14	96.79

В составе рудных тел установлены следующие основные жильные минералы — кварц (70–30%), гидрослюда (15–20%), серицит, каолинит, адунит, железистый карбонат, циркон, хлорит и алунит. Кварц по структуре мелкокристаллический, халцедоновидный, хрусталеvidный, к которому часто приурочена рудная минерализация. Преобладают прожилково-вкрапленные, пятнистые, брекчиевые и кавернозные текстуры; менее развиты — колломорфно-полосчатые и каркасно-пластинчатые [Пилицын и др., 2022].

Рудная минерализация в основном вкрапленная, реже прожилковая, часто приурочена к кавернам в мелкокристаллическом кварце. Концентрация рудных минералов в них обычно составляет от 1 до 2–5%. Основные рудные минералы представлены пиритом, арсенопиритом, полибазитом, акантитом, низкопробным самородным золотом. В меньшей степени развиты штрмейерит, серебросодержащий тетраэдрит, прустит и, значительно реже, встречаются сфалерит, халькопирит, пирсеит, пираргирит, стефанит, самородное серебро, марказит, галенит, касситерит и пирротин. В рудах повсеместно развита гидроокисно-сульфатная ассоциация. В процессе ее формирования на рудопроявлении непрерывно менялись физико-химические условия, о чем свидетельствует пульсационное колломорфно-зональное переслаивание гидроокислов железа и акантита, акантита и сульфатов меди [Пилицын и др., 2022].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РУДОНОСНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ

В составе изученных образцов рудоносных метасоматитов КВП преобладает SiO₂ (72.21–81.11%), присутствуют заметные концентрации Al₂O₃ (11.43–13.97%), Fe₂O_{3общ} (0.59–2.29), K₂O (3.33–5.98) и Na₂O (0.1–2.1); содержание сульфидов в изученных образцах низкое — S_{общ} не превышает 0.52% (табл. 1).

Как следует из рис. 2 и табл. 2, рудоносные метасоматиты КВП характеризуются явным обогащением широким спектром элементов (As, Ag, Au, Sb, Sn, Bi, W, Cs, Li, Be, Rb, Y, REE, U), по

сравнению со средними значениями верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан, 1988].

Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких (Bi, W, Cs, Li, Be, Rb, Y, REE, U) — до десятков (Sn, Sb) и сотен (As, Ag, Au) раз (рис. 3), что свидетельствует о геохимическом родстве микроэлементов и их синхронном участии в рудообразовании.

Состав РЗЭ изученных образцов приведен в табл. 2, а спектры РЗЭ, нормированных на хондрит, показаны на рис. 3.

Метасоматиты КВП характеризуются довольно высокими ΣРЗЭ (от 47.08 до 338.25 г/т). Нормированные на хондрит РЗЭ образуют пологие близхондритовые спектры (см. рис. 3) с отчетливыми европейскими минимумами (среднее Eu/Eu* — 0.38, см. табл. 2).

Легкие РЗЭ при повышении давления переходят в водный флюид, а тяжелые удерживаются в магме, что позволяет считать первые “гидрофильными”, а вторые “магмафильными” элементами [Жариков и др., 1999]. Кроме того, РЗЭ были разделены на три группы: цериевые — La, Ce, Pr, Nd, иттриевые — Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, скандиевые — Er, Yb, Lu [Минеев, 1974].

Таким образом, табл. 2 показывает, что в проанализированных пробах преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Изучено 10 образцов кварца из рудных прожилков месторождения Кыплатап. Два образца содержали пригодные для микротермометрических исследований флюидные включения. Среди флюидных включений в соответствии с известными критериями [Реддер, 1987] были выделены первичные, первично-вторичные и вторичные флюидные включения. К первичным отнесены флюидные включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина, либо приуроченные к зонам роста.

Вторичными считались включения, приуроченные к секущим минерал-хозяин трещинам. Пер-

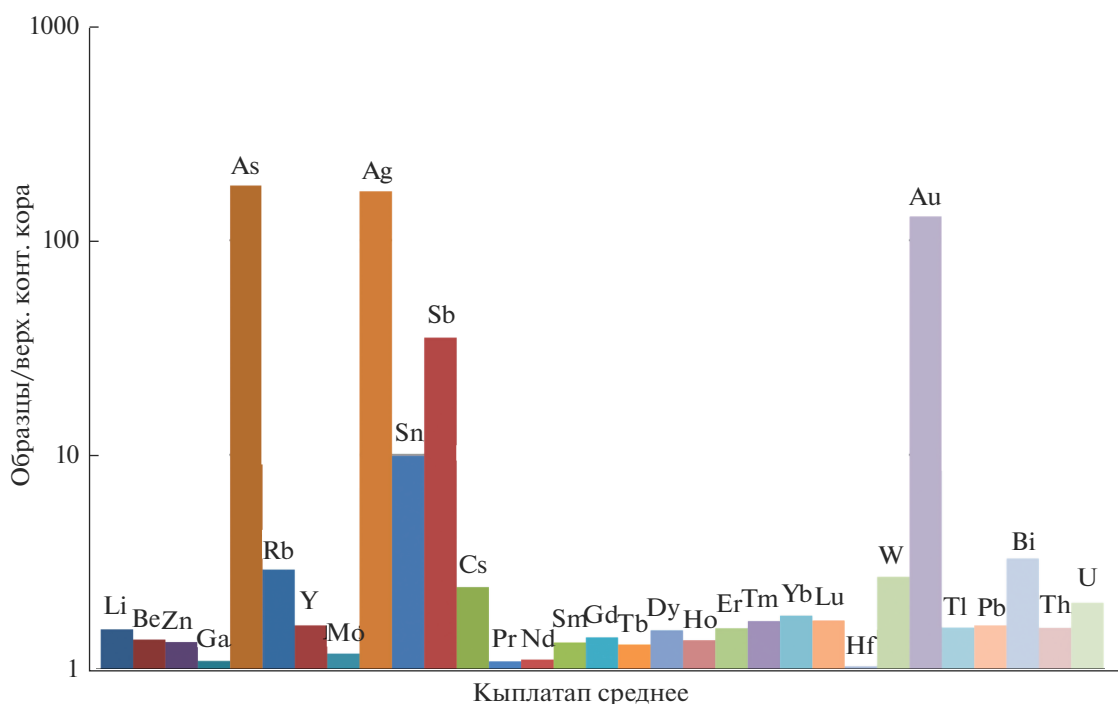


Рис. 2. Распределение основных микроэлементов в изученных образцах КВП, нормированных по отношению к средним значениям для верхней коры [Тейлор, Мак-Леннан, 1988]. Среднее по 5 пробам (см. табл. 2).

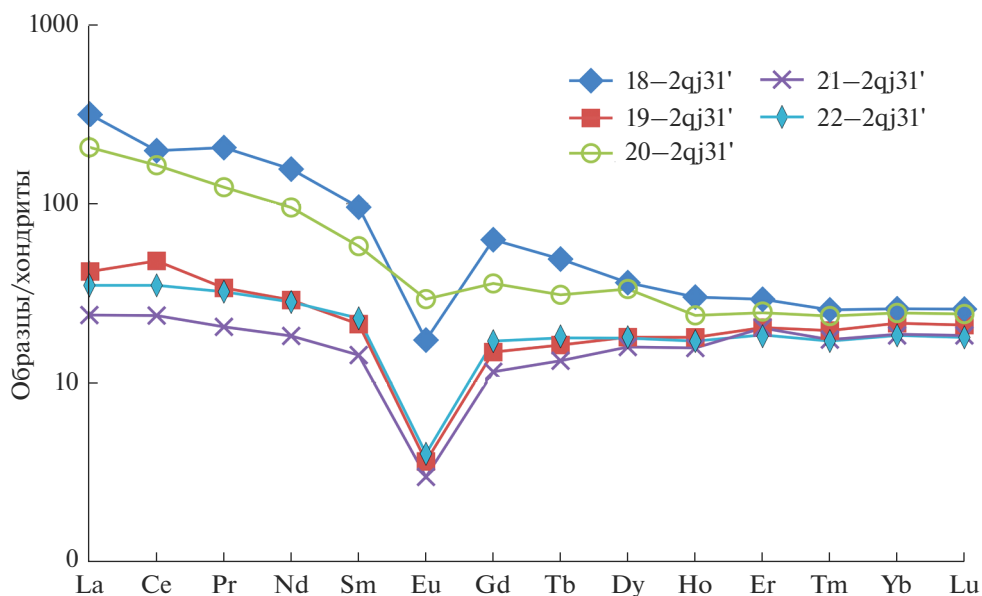


Рис. 3. Распределение РЗЭ, нормированных по хондритам [McDonough, Sun, 1995]: в изученных образцах КВП. Номера проб соответствуют табл. 1, 2.

вично-вторичные флюидные включения приурочены к трещинам, не достигающим внешних границ кристаллов и зерен, а по фазовому наполнению аналогичны первичным включениям.

По фазовому составу флюидных включений выделено два основных типа (рис. 4): 1) двухфазо-

вые газовой-жидкие включения водно-солевых растворов; 2) существенно газовые включения. Для термо- и криометрических исследований выбирались прежде всего флюидные включения, равномерно распределенные по объему отдельных зерен кварца и отнесенные нами к первич-

Таблица 2. Элементный состав (г/т) изученных образцов КВП

№ пробы	18-2qj31'	19-2qj31'	20-2qj31'	21-2qj31'	22-2qj31'	Cc
Au	0.15	0.15	0.38	0.12	0.16	0.19
Ag	0.87	1.06	14.05	5.64	23.25	8.97
As	162.53	173.34	112.36	851.16	3018.1	863.5
Sb	10.09	5.67	5.99	9.74	38.86	14.07
Cu	18.89	9.73	11.46	13.95	12.48	13.3
Pb	31.12	24.98	26.66	29.03	24.69	27.3
Zn	116.15	30.35	243.45	14.31	45.47	89.95
Li	34.81	35.98	37.377	31.630	44.840	36.927
Be	5.56	2.40	2.73	1.41	2.36	2.89
Sc	10.285	8.879	18.830	7.698	14.761	12.091
V	4.97	4.57	3.58	3.38	5.44	4.39
Cr	1.27	1.16	<ПО	1.65	1.54	1.12
Co	0.26	<ПО	1.28	0.09	0.13	0.35
Ni	<ПО	1.39	<ПО	<ПО	<ПО	0.28
Bi	0.73	0.3	0.4	0.47	0.74	0.53
Ga	20.88	24.9	19.19	9.65	21.25	19.17
Rb	235.79	281.78	243.46	240.83	223.5	245.07
Sr	33.94	15.71	62.95	19.51	6.32	27.69
Y	51.08	27.81	39.27	25.43	24.88	33.69
Zr	137.26	141.18	375.57	139.64	103.53	179.44
Nb	10.31	9.32	10.4	12.8	10.52	10.67
Mo	4.15	0.33	0.66	0.56	0.81	1.3
Sn	31.8	37.09	11.49	16.3	7.1	20.76
Cs	7.71	17.25	10.38	7.86	16.08	11.86
Ba	315.03	198.8	1740.63	644.32	130.81	605.92
La	75.63	9.88	49.12	5.63	8.26	29.7
Ce	121.92	29.39	100.33	14.48	21.48	57.52
Pr	19.11	3.15	11.53	1.91	2.97	7.73
Nd	71.68	13.26	43.96	8.28	12.81	30.0
Sm	14.22	3.09	8.53	2.11	3.41	6.27
Eu	0.94	0.2	1.54	0.15	0.21	0.61
Gd	12.4	2.95	7.14	2.30	3.43	5.64
Tb	1.76	0.58	1.12	0.47	0.64	0.91
Dy	8.88	4.33	8.24	3.86	4.38	5.94
Ho	1.63	0.97	1.3	0.85	0.93	1.13
Er	4.66	3.17	3.92	3.2	2.94	3.58
Tm	0.62	0.48	0.58	0.42	0.42	0.5
Yb	4.16	3.46	3.94	2.97	2.94	3.49
Lu	0.63	0.51	0.6	0.44	0.44	0.52
Hf	4.82	5.01	8.46	4.91	4.2	5.48
Ta	0.88	0.76	0.71	0.97	0.9	0.84
W	2.97	9.75	7.89	3.63	1.38	5.12
Tl	1.33	1.35	1.61	1.65	1.11	1.41
Th	17.14	18.23	14.0	16.28	16.46	16.42
U	4.33	7.22	4.73	5.73	5.63	5.53

Таблица 2. Окончание

№ пробы	18-2qj31'	19-2qj31'	20-2qj31'	21-2qj31'	22-2qj31'	Cc
Σ REE	338.25	75.41	241.84	47.08	65.23	153.57
Σ LREE	303.51	58.97	215.01	32.56	49.14	131.84
Σ HREE	34.75	16.44	26.83	14.52	16.1	21.73
Σ LREE/ Σ HREE	8.73	3.59	8.01	2.24	3.05	5.13
Hf/Sm	0.34	1.62	0.99	2.33	1.23	1.3
Nb/La	0.14	0.94	0.21	2.27	1.27	0.97
Th/La	0.23	1.85	0.28	2.89	1.99	1.45
Y/Ho	31.34	28.79	30.27	29.93	26.86	29.44
U/Th	0.25	0.4	0.34	0.35	0.34	0.34
Rb/Sr	6.95	17.94	3.87	12.34	35.36	15.29
Au/Ag	0.17	0.15	0.03	0.02	0.01	0.07
Eu/Eu*	0.33	0.29	0.7	0.31	0.28	0.38
Ce/Ce*	0.81	1.38	1.04	1.15	1.13	1.1
LaN/YbN	12.36	1.94	8.48	1.29	1.91	5.19
LaN/SmN	3.32	1.99	3.6	1.66	1.51	2.42
GdN/YbN	2.41	0.69	1.47	0.63	0.94	1.23
LaN/LuN	12.43	2.0	8.51	1.31	1.96	5.25
Σ Ce	288.35	55.68	204.94	30.3	45.52	124.96
Σ Y	39.83	12.11	27.86	9.76	12.98	20.51
Σ Sc	10.07	7.62	9.04	7.03	6.73	8.1
Eu/Sm	0.07	0.06	0.18	0.07	0.06	0.09

Примечание. Определение элементов и REE методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS), аналитический центр коллективного пользования ИГЕМ РАН; ПО – предел обнаружения; REE – РЗЭ; LREE – легкие РЗЭ; HREE – тяжелые РЗЭ.

ным включениям. Однако по первично-вторичным и вторичным включениям также были получены параметры фазовых переходов.

Данные термо- и криометрических исследований более 70 индивидуальных флюидных включений в кварце рудных прожилков месторождения Кыплатап приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Рудообразующий флюид месторождения Кыплатап содержал хлориды Na, Mg и K. Об этом свидетельствуют хлоридные эвтектики растворов включений (от -25 до -31°C). Двухфазовые газо-жидкие флюидные включения в кварце гомогенизируются в жидкость при достаточно высоких температурах от 203 до 343°C , а концентрация солей изменяется от 0.3 до 6.2 мас. %-экв. NaCl, плотность флюида составляет 0.60 – 0.87 г/см³.

Включения типа 1 в ряде случаев захватывались вместе с газовыми включениями типа 2, что свидетельствует о гетерогенном состоянии флюида. Глубокое охлаждение газовых включений до температур -180°C не выявило конденсации каких-либо фаз, что свидетельствует о заполнении газовых включений только малоплотным водяным паром. Давление водяного пара изменялось

от 40 до 140 бар при изменении температур от 267 до 343°C .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже упоминалось выше, установлено, что микроэлементы и РЗЭ активно реагируют на окислительно-восстановительную среду природных обстановок, что позволяет использовать их в качестве геохимических индикаторов источников вещества и оценивать окислительно-восстановительные условия минералообразования.

Известно, что гидротермальные флюиды, содержащие Cl, эффективно концентрируют LREE, но бедны HREE [Oreskes, Einaudi, 1990], в этом случае отношения Hf/Sm, Nb/La и Th/La в рудах, как правило, меньше, чем 1; а флюиды, обогащенные F, синхронно концентрируют легкие и тяжелые РЗЭ – значения Hf/Sm, Nb/La и Th/La обычно больше, чем 1 [Oreskes, Einaudi, 1990]. Руды месторождений КВП явно обогащены легкими и обеднены тяжелыми РЗЭ, большая часть проб имеют значения Hf/Sm, Nb/La и Th/La значительно больше 1 (см. табл. 2). Следовательно, рудообразующие флюиды принадлежали NaCl–H₂O гидротермальной системе, обогащенной F.

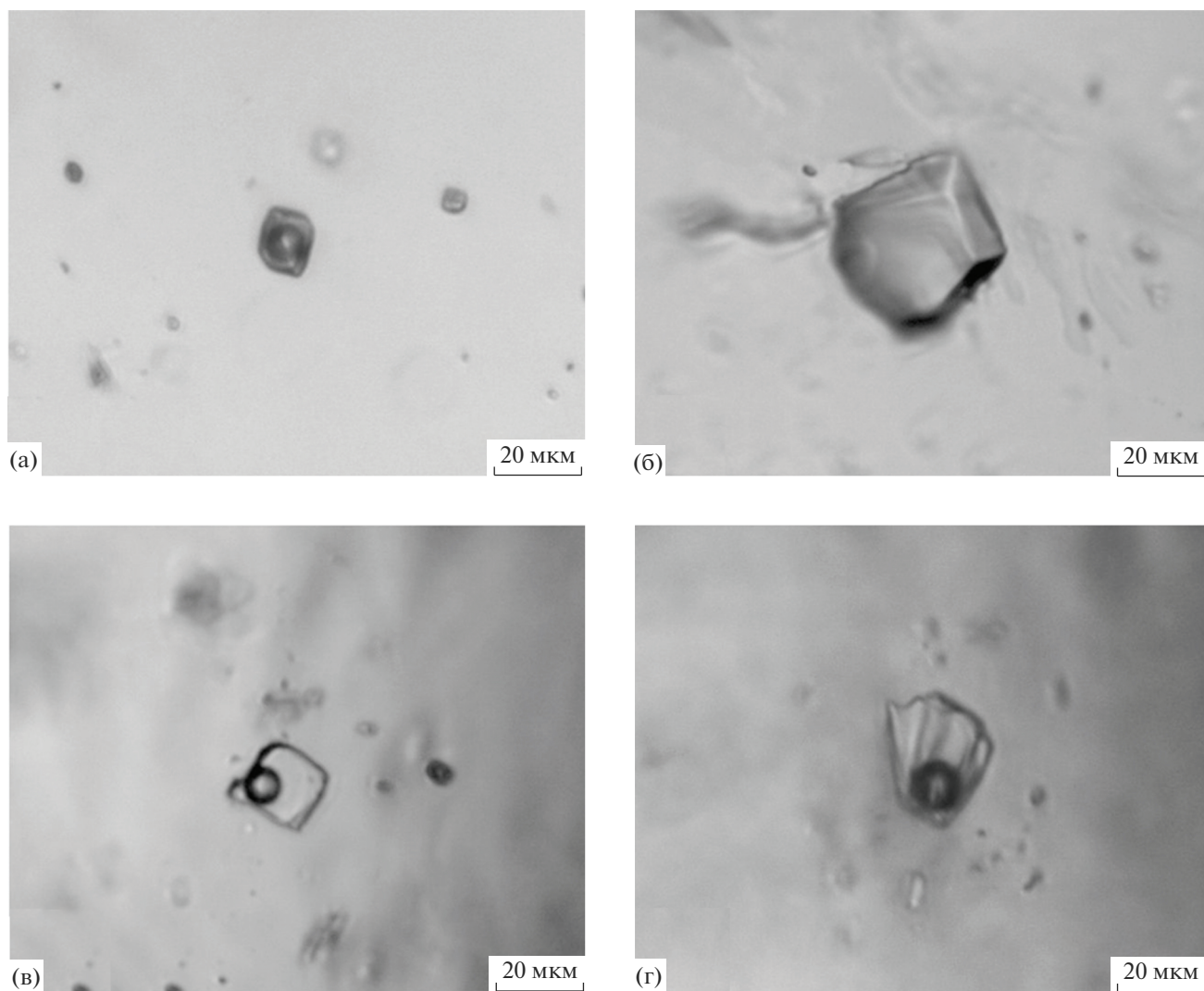


Рис. 4. Типы флюидных включений в кварце рудных прожилков месторождения Кыплатап. а, в, г — двухфазовые включения водно-солевых растворов типа 1; б — газовое включение типа 2.

Значения U/Th руд отражают окислительно-восстановительные особенности вмещающей среды [Jones, Manning, 1994]: в окислительной среде $U/Th \leq 0.75$; $U/Th 0.75-1.25$ характерно для не содержащей кислород среды; для восстановительной среды $U/Th > 1.25$. Судя по табл. 2, значения U/Th в рудах в два раза меньше, чем 0.75 (в среднем 0.34), что свидетельствует об окислительной среде.

Эффективное использование отношения Y/No для оценки происхождения рудообразующих флюидов показано в работах [Bau, 1991; Jones, Manning, 1994; Monecke et al., 2002]. В соответствии с табл. 2, значения отношения Y/No изученных проб КВП варьируют от 26.85 до 31.34, что коррелирует с интервалом отношений характерных для современных гидротермальных

флюидов задуговых бассейнов [Bau, 1991; Jones, Manning, 1994; Monecke et al., 2002].

Сумма концентраций РЗЭ в изученных образцах (см. табл. 2) соответствует таковым вулканических пород чукотского отрезка ОЧВП [Tikhomirov et al., 2016] и андезитам островных дуг [Кравцова, 2010].

Eu и Ce аномалии обычно рассматриваются как маркеры окислительно-восстановительного потенциала среды рудообразования [Горячев и др., 2008; Jones, Manning, 1994]. В изученных пробах КВП (см. табл. 2) значения Ce/Ce^* варьируют от слабо отрицательных до умеренно положительных значений (от 0.81 до 1.38), а значения Eu/Eu^* изменяются от 0.28 до 0.7. Такое сочетание Ce/Ce^* и Eu/Eu^* указывает на окислительные условия, преобладавшие при рудообразовании.

Таблица 3. Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце рудных прожилков месторождения Кыплатап

№ пробы	Тип включений*	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$	$C, \text{мас. \% - экв. NaCl}$	$d, \text{г/см}^3$	$P, \text{бар}$
КЫПС	1 П	4	291	–31	–3.9	6.2	0.80	—
24146.8	1 П-В	5	276	–29	–2.9	4.7	0.80	—
	1 П-В	7	265	–28	–2.7	4.4	0.82	—
	1 П-В	6	241	–28	–0.9	1.5	0.82	—
КП-1	1, 2 П	12	343	–25	–0.6	1.0	0.60	140
	1, 2 П	14	287	–26	–0.6	1.0	0.73	60
	1, 2 П	3	284	–26	–0.2	0.3	0.73	60
	1 П-В	4	278	–31	–1.5	2.5	0.77	—
	1 П-В	8	267	–27	–0.3	0.5	0.76	40
	1 П-В	3	264	–25	–0.7	1.2	0.77	—
	1 П-В	6	262	–28	–1.1	1.8	0.79	—
	1 В	5	203	–28	–0.5	0.8	0.87	—

Примечание. *П — первичные, П-В — первично-вторичные, В — вторичные; 1 — двухфазовые газовой-жидкие включения, 2 — газовые включения.

Чрезвычайно низкие Eu/Sm отношения (в среднем 0.09) в изученных рудах (см. табл. 2) позволяют считать, что рудообразование в КВП протекало на верхнекоровом уровне [Винокуров, 1996].

По спектрам РЗЭ в ОЧВП отчетливо выделяются три группы руд [Волков и др., 2018а]. Спектры месторождений первой группы (Купол, Валунистое, Марошка и др.) характеризуются хорошо выраженными Eu максимумами [Волков и др., 2018а, 2020а]. Отчетливые Eu минимумы установлены для спектров руд месторождений второй группы (Двойное, Пепенвеем, Гольцовое и др.) [Волков и др., 2018а, 2018б; Савва и др., 2021]. Месторождения первой и ряд объектов второй группы (Двойное и др.) отнесены к низкосульфидизированному эпитептермальному классу [Волков и др., 2018а]. Большая часть объектов второй группы относится к промежуточно-сульфидизированному классу [Савва и др., 2021]. Слабонаклонные близзондритовые спектры без явных Eu максимумов и минимумов характерны для руд третьей группы — высокосульфидизированного эпитептермального класса [Волков и др., 2018а, 2020б].

Изученные образцы КВП попадают во вторую группу (см. рис. 3), что может свидетельствовать о принадлежности к промежуточно сульфидизированному эпитептермальному классу и корреспондирует с полученным ранее выводом [Пилицын и др., 2023].

Термометрические исследования флюидных включений из кварца этих же образцов КВП показали, что рудообразующий флюид содержал хлориды Na, Mg и K, а эпитептермальная минерализация отлагалась гомогенными гидротермальными

флюидами с концентрациями солей (0.3–6.2 мас. %-экв. NaCl), плотность флюида — 0.60–0.87 г/см³; температуры гомогенизации включений варьировали от 203 до 343°C, давление водяного пара изменялось от 40 до 140 бар. Приведенные выше данные обладают большим сходством с таковыми по месторождению Гольцовое [Савва и др., 2021] и другими месторождениями промежуточно сульфидизированного класса [Wang et al., 2019].

Таким образом, полученные геохимические и термометрические данные, подтверждают принадлежность изученной минерализации КВП к

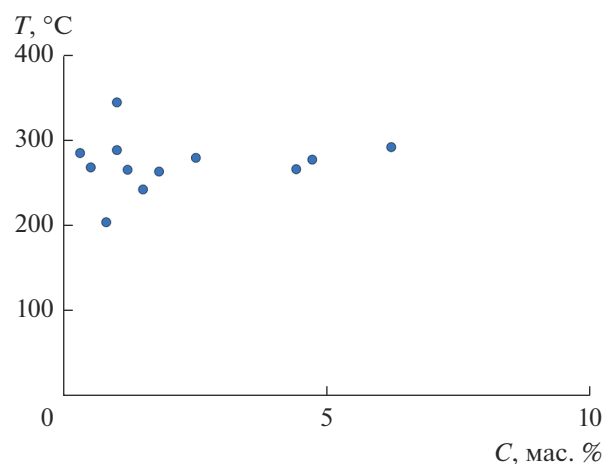


Рис. 5. Диаграмма “Температура–Концентрация солей” для минералообразующих флюидов из флюидных включений в кварце рудных прожилков месторождения Кыплатап.

промежуточно сульфидизированному эпитеp-мальному классу.

Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки эпитеpмальных Au–Ag месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили установить, что изученные образцы рудоносных метасоматитов КВП характеризуются явным обогащением широким спектром элементов, по сравнению со средними значениями верхней коры. В спектрах РЗЭ преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы.

Сравнение полученных данных с известными опубликованными примерами [Винокуров и др., 1999; Кравцова, 2010; Волков и др., 2018а] показывает, что заметное обогащение изученных образцов РЗЭ, преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, очень низкие Eu/Sm отношения (≤ 1), слабо наклонные близхондритовые спектры с явными европиевыми минимумами — типичны для эпитеpмальной рудообразующей системы КВП. Значения Ce/Ce* варьируют от слабо отрицательных до умеренно положительных значений (от 0.81 до 1.38), а значения Eu/Eu* изменяются от 0.28 до 0.7. Такое сочетание Ce/Ce* и Eu/Eu* указывает на окислительные условия, преобладавшие при рудообразовании.

Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце показывают, что рудообразующий флюид содержал хлориды Na, Mg и K, эпитеpмальная минерализация отлагалась гомогенными гидротермальными флюидами с концентрациями солей (0.3–6.2 мас. %-экв. NaCl), плотность флюида — 0.60–0.87 г/см³, при температурах от 203 до 343°C, давление водяного пара изменялось от 40 до 140 бар.

Полученные геохимические и термометрические данные, подтверждают выдвинутое ранее предположение — о принадлежности, изученной минерализации КВП к промежуточно сульфидизированному эпитеpмальному классу [Пилицын и др., 2023]. Эти данные, указывают на андезитовые магмы и метеорные воды как наиболее вероятные источники флюидов.

Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки эпитеpмальных Au–Ag месторождений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белый В.Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Савва Н.Е., Прокофьев В.Ю., Колова Е.Е., Доломанова-Тополь А.А., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю. Эпитеpмальные Au–Ag–Se–Te месторождения Чукотки (арктическая зона России): металлогения, минеральные парагенезисы, флюидный режим // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 4. С. 541–568.
- Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их генетическое значение // Докл. РАН. 1996. Т. 346. № 6. С. 792–795.
- Волков А.В., Сидоров А.А., Прокофьев В.Ю., Савва Н.Е., Колова Е.Е., Мурашов К.Ю. Геохимические особенности эпитеpмальных Au–Ag месторождений Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (Северо-Восток России) // Вулканология и сейсмология. 2018а. № 6. С. 1–20.
- Волков А.В., Савва Н.Е., Колова Е.Е., Прокофьев В.Ю., Мурашов К.Ю. Au–Ag эпитеpмальное месторождение Двойное (Чукотка) // Геология рудных месторождений. 2018б. Т. 60. № 6. С. 590–609.
- Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Винокуров С.Ф., Мурашов К.Ю., Андреева О.В., Киселева Г.Д., Вольфсон А.А., Сидорова Н.В. Эпитеpмальное Au–Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия) геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия рудообразования // Геология рудных месторождений. 2020а. Т. 62. № 2. С. 107–133.
- Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А., Галямов А.Л., Вольфсон А.А., Сидорова Н.В. Условия формирования Au–Ag эпитеpмальной минерализации Арыкэваамского вулканического поля (Центральная Чукотка) // Вулканология и сейсмология. 2020б. № 4. С. 13–21.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.В. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444.
- Жариков В.А., Горбачев Н.С., Латфутт П., Дохерти В. Распределение редкоземельных элементов и иттрия между флюидом и базальтовым расплавом при давлениях 1–12 кбар (по экспериментальным данным) // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 239–241.
- Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золотосеребряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2010. 291 с.
- Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 1974. 241 с.
- Пилицын А.Г., Волков А.В., Савва Н.Е., Григорьева А.В., Пилицына Т.А., Сидорова Н.В. Эпитеpмальная Ag–Au минерализация Кыплатапского вулканического поля (Центральная Чукотка) // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 3–16.
- Пилицын А.Г., Волков А.В., Пилицына Т.А. Геохимические особенности Ag–Au рудопроявления Кыплатап

(Центральная Чукотка) // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 12. № 4. С. 31–47.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1, 2. 1092 с.

Савва Н.Е., Волков А.В., Любимцева Н.Г., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. Ag–Pb–Zn-месторождение Гольцовое (Северо-Восток России): геологическое строение, минералого-геохимические особенности, условия рудообразования // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 3. С. 207–235.

Соколов С.Д., Бондаренко Г.Е., Морозов О.Л., Григорьев В.Н. Зона перехода Азиатский континент – Северо-Западная Пасифика в позднеюрско-раннемеловое время // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М.: Наука, 1999. С. 30–82.

Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.

Тихомиров П.Л., Прокофьев В.Ю., Калько И.А., Анлеталин А.В., Николаев Ю.Н., Кобаяси К., Накамура Э. Постколлизийный магматизм Западной Чукотки и раннемеловая тектоническая перестройка Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2017. № 2. С. 32–54.

Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium // Chem. Geol. 1991. V. 93. P. 219–230.

Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano: Siena, 1994. P. 117–130.

Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.

Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.

McDonough W.F., Sun S.S. The Composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.

Monecke T., Kempe U., Gotze J. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study // Earth. Planet. Sci. Lett. 2002. V. 202. P. 709–724.

Oreskes N., Einaudi M.T. Origin of rare-earth element enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu–U–Au–Ag deposit, Roxby Downs, South Australia // Econ. Geol. 1990. V. 85. № 1. P. 1–28.

Tikhomirov P.L., Kalinina E.A., Moriguti T., Makishima A., Kobayashi K., Nakamura E. Trace element and isotopic geochemistry of Cretaceous magmatism in NE Asia: Spatial zonation, temporal evolution, and tectonic controls // Lithos. 2016. V. 264. P. 453–471.

Wang L., Qin Ke-Zh., Song G.-X., Li G.-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification // Ore Geology Reviews. 2019. V. 107. P. 434–456.

Conditions of Formation of Epithermal Mineralization of the Kyplatap Volcanic Field (Central Chukotka)

A. V. Volkov^{1,*}, A. G. Pilitsyn^{2,**}, V. Yu. Prokofiev¹, A. A. Dolomanova-Topol¹, and K. Yu. Murashov¹

¹Institute of Ore Deposits Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia

²Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Veresaeva str., 15, Moscow, 121357 Russia

*e-mail: tma2105@mail.ru

**e-mail: allexpil@yandex.ru

The article considers the geochemical features and conditions of the formation of substantially silver mineralization of the Kyplatap volcanic field (KVF), of the Chaunsky zone, of the Central Chukchi Sector, of the Okhotsk-Chukchi volcanic belt (OChVB). New data on the composition, distribution and grade of trace elements, including REE in ores, are presented. The noticeable enrichment REE of the studied samples, the predominance of light lanthanides over heavy ones, very low Eu/Sm ratios (≤ 1), weakly inclined near-chondrite spectra with obvious Eu minima are typical for the epithermal ore-forming system of the KVF. The Ce/Ce* vary from slightly negative to moderately positive values (from 0.81 to 1.38), and the Eu/Eu* vary from 0.28 to 0.7. This combination of Ce/Ce* and Eu/Eu* indicates the oxidative conditions prevailing during ore formation. The results of thermo- and cryometric studies of fluid inclusions in quartz allowed us to establish that the ore-forming fluid contained Na, Mg and K chlorides, epithermal mineralization was deposited by homogeneous hydrothermal fluids with salt concentrations (0.3–6.2 wt. %-eq. NaCl), fluid density – 0.60–0.87 g/cm³, at temperatures from 203 to 343°C, water vapor pressure varied from 40 to 140 bar. The obtained geochemical and thermometric data confirm the assumption put forward earlier – that the studied mineralization of KVF belongs to the intermediate sulfidation epithermal class. These data point to andesite magmas and meteoric waters as the most likely sources of fluids. The information in the article is of practical importance for regional predictive metallogenic constructions, prospecting and evaluation of epithermal Au–Ag deposits.

Keywords: OChVB, Central Chukotka, Kyplatap volcanic field, trace elements, REE, fluid inclusions, ore formation conditions