

Халькофильная минерализация в гематитовых жилах аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров): следствия для формирования Fe (Cu,Ag)-S-O парагенезисов

©2024 А. Н. Соловьева[✉], Д. Р. Зозуля, Е. Э. Савченко, Е. С. Борисенко

Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана, д. 14,
184209, Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация

Аннотация

Введение: в статье приведены данные о необычных минеральных парагенезисах в системе Fe-Cu-Ag-Sb-S-O гематитовых жил аметистового месторождения Мыс Корабль. Эти тела можно отнести к серии флюорит-барит-кварц-карбонатных жил, широко распространенных в северном борту Кандалакшского грабена. Исследование парагенезисов систем Fe-S-O и Fe-Cu-S-O имеет большое значение, так как их поведение определяет многие закономерности распределения металлов в месторождениях.

Методика: для исследования состава минералов использовался сканирующий электронный микроскоп Zeiss EVO-25 с энерго-дисперсионным анализатором Aztec UltimMax-100 (ЦКП КНЦ РАН, Апатиты).

Результаты и обсуждения: халькофильная минерализация представлена сульфидами (галенит, киноварь, группа халькозина), сульфосолями серебра (аргентополибазит, пираргирит) и сульфоарсенидами (арсенипирит). Минералы тесно ассоциируют с гидротермальным пластинчатым гематитом. Минеральные парагенезисы свидетельствуют о низкотемпературных (<200°C) условиях их формирования. Авторами предложен механизм кристаллизации данной минерализации в ходе изменений окислительно-восстановительного потенциала в системе Fe-S-O.

Заключение: источником серебра в гидротермальных жилах мог служить аутигенный поровый гематит из вмещающих аркозовых песчаников терской свиты, который под воздействием гидротермальных растворов растворялся и переотлагался в виде практически стехиометрически чистого гематита с выделением серебра в гидротермальный раствор.

Ключевые слова: месторождение Мыс Корабль; гематитовые жилы; халькофильная минерализация; гидротермальные условия.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках темы НИР № FMEZ-2024-0004 и гранта Российского научного фонда № 22-17-20002 <https://rscf.ru/project/22-17-20002/>.

Для цитирования: Соловьева А. Н., Зозуля Д. Р., Савченко Е. Э., Борисенко Е. С. Халькофильная минерализация в гематитовых жилах аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский полуостров): следствия для формирования Fe(Cu,Ag)-S-O парагенезисов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 3. С. 48-59. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/48-59>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Соловьева Анна Николаевна, e-mail: a.soloveva@ksc.ru

Введение

Исследование парагенезисов систем Fe-S-O и Fe-Cu-S-O имеет большое значение, так как их поведение определяет многие закономерности распределения металлов в месторождениях [1, 2]. Режимы серы и кислорода имеют разнонаправленные тенденции, от которых зависит изменение минеральных ассоциаций в стадийности гидротермального рудообразования.

Объектом исследования является необычная халькофильная минерализация в недавно открытых гематитовых жилах в районе аметистового месторождения Мыс Корабль. Эти тела можно отнести к серии флюорит-барит-кварц-карбонатных жил, широко распространенных в северном борту Кандалакшского грабена (Кандалакшское и Терское побережья Колыского п-ва). Некоторые из этих жил продуктивны на свинцово-цинковую минерализацию, иногда с попутными серебром и медью.

Ранее авторами была предложена схема происхождения гематитовых жил [3]. Скорее всего, насыщение железом гидротермальных растворов происходило при растворении порового гематитового цемента вмещающих аркозовых песчаников терской свиты. Впоследствии, в ходе тектонической разгрузки, кристаллизовались сами жилы, сложенные только пластинчатым гематитом. В его составе отсутствуют существенные

примеси (например, титана [3]) в отличие от порового (аутигенного) гематита.

Целью работы является детальное изучение обнаруженных минералов халькофильных элементов и выявление механизмов их формирования в железоокисной гидротермальной системе.

Гидротермальные проявления побережья Белого моря

В районе побережья Белого моря (от Порьей губы до мыса Корабль) известны более 70 крупных гидротермальных жил преимущественно кварц-флюорит-барит-кальцитового состава с галенит-сфалеритовой минерализацией (рис. 1). На о. Медвежий (район губы Порьей) обнажаются кварц-кальцитовые жилы со свинцово-цинковой и серебряной минерализацией [4, 5, 6]. Восточнее от этого района описаны флюорит-кварц-кальцитовые жилы Елокоровского наволока [4, 5]. В районе р. Умба в восточной части берега находится Ройменский наволок с кварцево-кальцитовыми жилами со свинцово-цинковой минерализацией [4]. Для всех этих районов характерна следующая халькофильная минерализация: сфалерит, галенит, халькопирит, пирит, борнит, марказит, молибденит, реже куприт, малахит, азурит, самородная медь, серебро, ковеллин [4, 5]. Известны и хорошо изучены

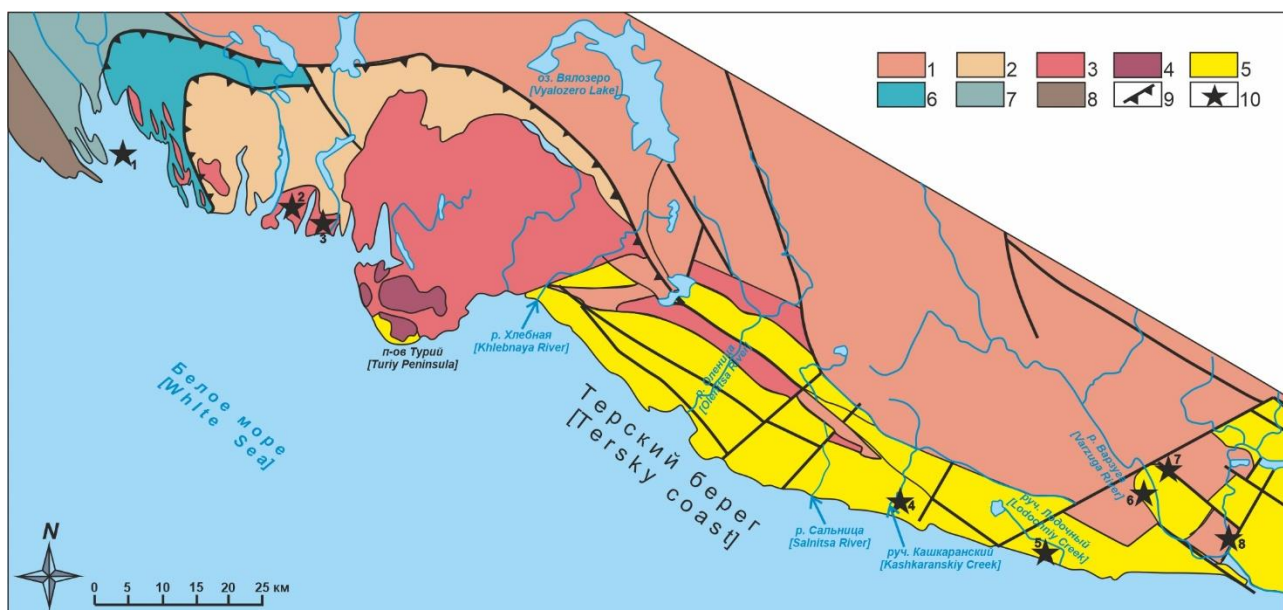


Рис. 1. Геологическая карта-схема северного побережья Белого моря с проявлениями гидротермальных жил и штокверков. Составлена с использованием [13]: 1 – неоархейский – палеопротерозойский гранитогнейсовый комплекс; 2 – палеопротерозойские кислые гранулиты; 3 – палеопротерозойские порфировидные гранитоиды; 4 – среднепалеозойский комплекс щелочных ультрамафитов; 5 – терригенные образования терской свиты; 6 – палеопротерозойские гранулиты среднего состава; 7 – палеопротерозойские основные гранулиты; 8 – палеопротерозойские габбро-анортозиты, габбро, диориты; 9 – надвиги, взбросы; 10 – гидротермальные месторождения и проявления: 1 – район Порьей губы (о. Медвежий), 2 – Елокоровский наволок, 3 – Ройменский наволок, 4 – Кашкаранское, 5 – Мыс Корабль, 6 – Хутор Яма, 7 – Морской Порог, 8 – район р. Кича (Устье).

[Fig. 1. Geological sketch-map of the northern White Sea coast with shown hydrothermal veins and stockworks. Modified after [13]: (1) – Neoarchean – Paleoproterozoic granite-gneiss complex; (2) – Paleoproterozoic acidic granulites; (3) – Paleoproterozoic porphyritic granitoids; (4) – Middle Paleozoic complex of alkaline ultramafic rocks; (5) – terrigenous formations of the Tersky suite; (6) – Paleoproterozoic granulites of intermediate composition; (7) – Paleoproterozoic basic granulites; (8) – Paleoproterozoic gabbro-anorthosites, gabbro, diorites; (9) – thrusts, reverse faults; (10) – deposits and occurrences of hydrothermal formations: (1) – area of Porya Bay (Medvezhiy Island), (2) – Elokorgovsky navolok, (3) – Roymensky navolok, (4) – Kashkaranskoye, (5) – Cape Korabl', (6) – Khutor Yama, (7) – Sea Threshold, (8) – district of the river Kitsa (Mouth).]

жилы и в районе Терского побережья, представленные барит-флюорит-аметистовыми [7] и гематитовыми [3, 8] жилами и штокверками месторождения Мыс Корабль и баритовыми жилами в районе р. Кица [5]. Небольшие проявления аметиста (Кашкаранское, Устье, Хутор Яма, Морской Порог и др.) известны в восточной части Терского побережья [9, 10]. Таким образом, можно наблюдать латеральную (с запада на восток) смену кварц-кальцитовых жил с сульфидной минерализацией барит-флюорит-аметистовыми с незначительной (или отсутствием) сульфидной минерализации. Возможно, это связано с разной степенью эрозионного среза (проявления с богатой свинцово-цинковой минерализацией залегают в палеопротерозойских породах фундамента, тогда как аметистовые и гематитовые жилы - в перекрывающих их рифейских песчаниках терской свиты).

Все эти проявления рассматриваются как часть единой формации средне-низкотемпературных гидротермальных образований, обусловленной пострифейской (палеозойской?) тектоно-термальной активизацией, связанной с долгоживущими глубинными разломами Кандалакшского грабена Беломорской рифтовой

системы [5, 11].

В северо-восточной части Кольского региона известны гидротермальные жилы Усть-Понойской зоны, которые отличаются от вышеперечисленных проявлений наличием продуктивной меднорудной минерализации. Жилы подразделяются на две генетические группы. *Гидротермально-метасоматическая группа* - жилы кварц-микроклинового и кварцевого состава с медной минерализацией (халькопирит, борнит, гр. халькозина) и таких рудных минералов как пирит, гематит, магнетит, сфалерит. Вторая генетическая группа - *жилы выполнения* - кварц-карбонатного, баритового и кварцевого состава с полиметаллической сульфидной минерализацией (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, группа халькозина, борнит, ковеллин, самородная медь) [12].

Геологическая ситуация

Месторождение Мыс Корабль располагается в южной части Кольского региона (рис. 2) и представляет серию гидротермальных проявлений в виде кварцевых (аметистовых), флюоритовых, баритовых, а также

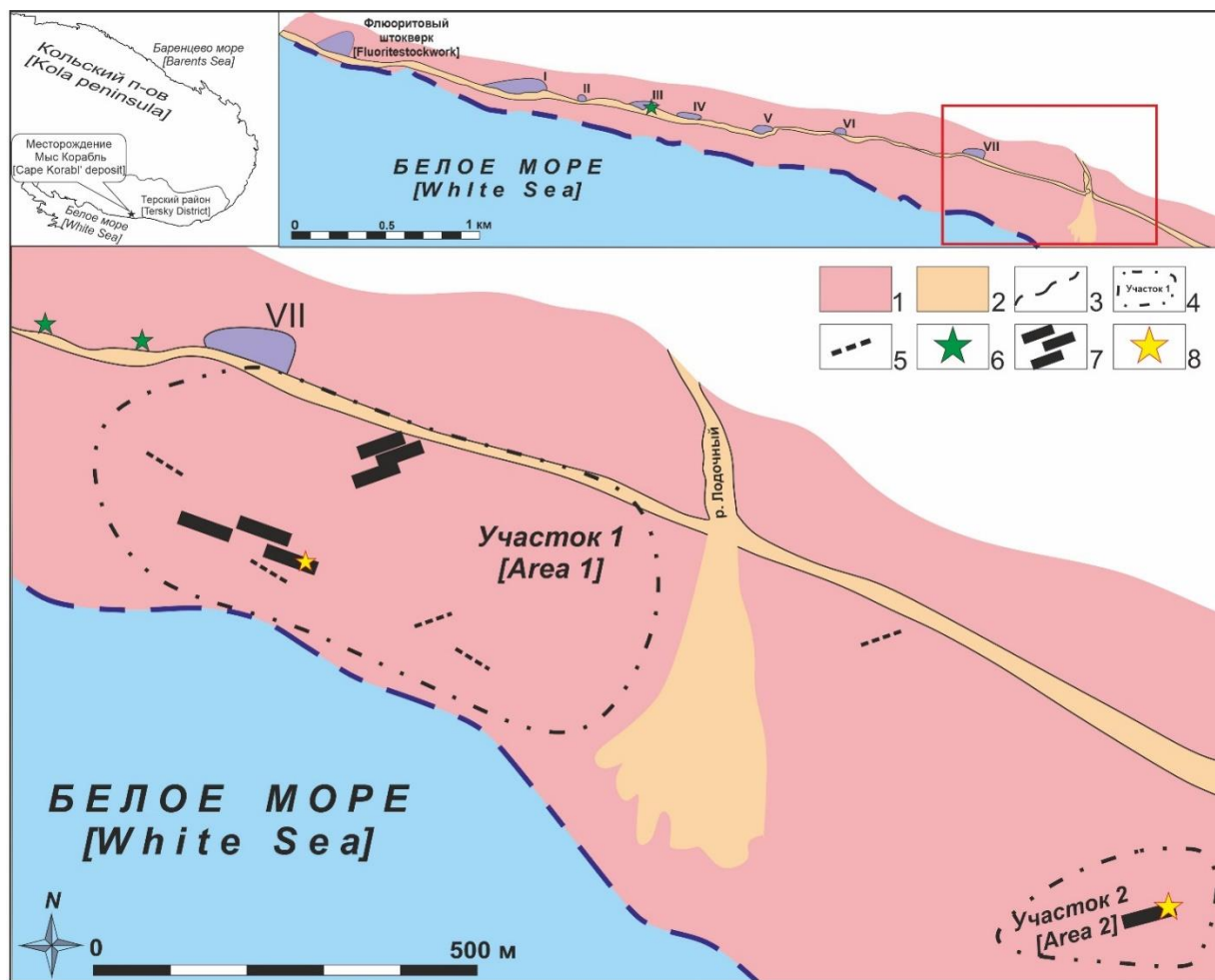


Рис. 2. Геологическая карта-схема месторождения Мыс Корабль с выделенным детальным районом развития гематитовых жил: 1 – красноцветные песчаники терской свиты; 2 – аллювиально-пляжевые отложения; 3 – граница береговой линии; 4 – участки проявления гематитовых жил и брекчий (включают ореолы рассеяния их обломков); 5 – простирающие трещиноватости в песчаниках; 6 – участки проявления медной минерализации (ковеллин, халькозин и малахит); 7 – гематитовые жилы (вне масштаба); 8 – участки проявления халькофильной минерализации в гематитовых жилах.

[Fig. 2. Geological sketch-map of the Cape Korabl' deposit with a highlighted detailed area of development of hematite veins: (1) – red sandstones of the Tersky suite; (2) – alluvial-beach deposits; (3) – coastline boundary; (4) – occurrences of hematite veins and breccias (include halos of their fragments' dispersion); (5) – strike of fracturing in sandstones; (6) – occurrences of copper mineralization (covellite, chalcocite and malachite); (7) – hematite veins (out of scale); (8) – occurrences of chalcophile mineralization in hematite veins.]

недавно обнаруженных гематитовых жил пространственно связанных с трещиноватостью и брекчированием вмещающих песчаников терской свиты [3, 8]. В пределах месторождения выделяют 8 участков (штокерков), сложенных кварцевыми, баритовыми и флюоритовыми жилами, протягивающиеся примерно на 3 км (рис. 2). Согласно Н.И. Фришману [7, 14] последовательность формирования этих гидротермальных тел представляется следующей: 1 стадия – кристаллизация раннего флюорита; 2 стадия – формирование кварца включает несколько подстадий (ранняя высокотемпературная ($>400^{\circ}\text{C}$), «аметистовая» ($200\text{--}300^{\circ}\text{C}$), низкотемпературная (160°C и ниже с переотложением кварца)); 3 стадия – кристаллизация барита и поздних

генераций флюорита. Кроме того, в пределах выработки III (рис. 2) были обнаружены крупные глыбы ($1.5\text{--}2$ м в диаметре), состоящие в основном из крупнокристаллического кальцита с небольшим содержанием флюорита и барита, а также обломков песчаников терской свиты (рис. 3 а). В выработках III и VII обнаружена небогатая медная минерализация (рис. 2), представленная халькозином [14], ковеллином (наши данные, рис. 3 б) и развивающимся по нему малахитом (рис. 3 с). Минералы меди приурочены к участкам развития позднего прожилкового кварца. В предложенной схеме Фришмана Н. И. кристаллизация кальцита и минералов меди, вероятнее всего, происходила на 3 стадии.

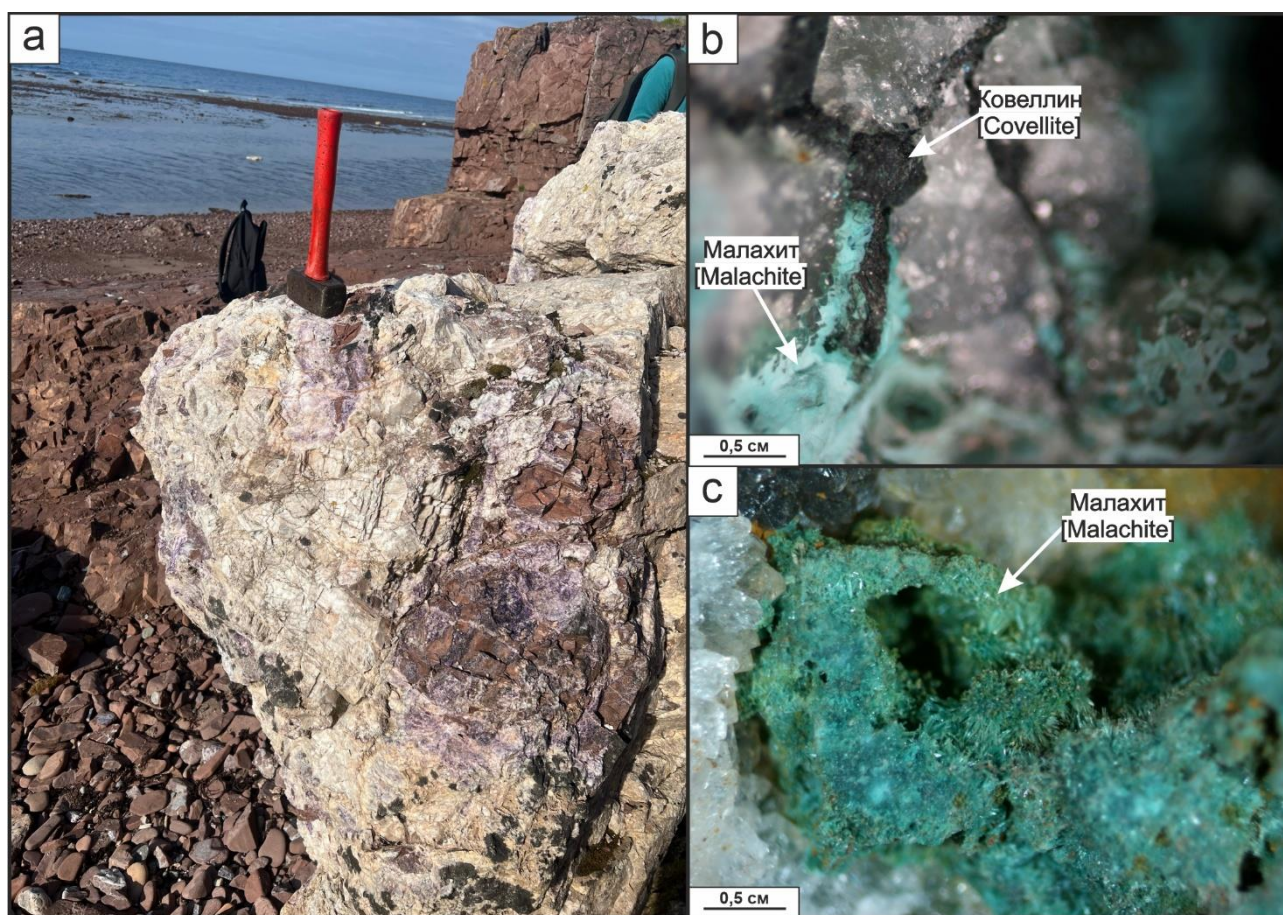


Рис. 3. Кальцитовые глыбы с розовато-фиолетовым флюоритом и обломками красноцветных песчаников (а) и характерные проявления медной минерализации (ковеллин (b), малахит (с)) месторождения Мыс Корабль.

[Fig. 3. Calcite blocks with pinkish-violet fluorite and fragments of red sandstones (a) and characteristic copper mineralization (covellite (b), malachite (c)) of the Cape Korabl' deposit.]

В 2021 году в районе месторождения Мыс Корабль были впервые описаны новые гидротермальные образования – гематитовые жилы и брекчии [3, 8]. Гематитовые жилы и брекчии обнажаются в приливно-отливной зоне и приурочены к двум системам трещин

в красноцветных песчаниках терской свиты: северо-восточного и субширотного простирания (рис. 2). Жилы формируют кусты, реже представлены отдельными телами и имеют мощность от 2 до 20 см, протяжённость от 2 до 15 метров. Зоны брекчирования,

состоящие из угловатых обломков песчаников размером от 1 до 10 см и гематитового цемента, развиты вблизи кустов жил и имеют видимые площади выхода на поверхность около 1–2 м². Часто гематитовые жилы и брекчии секутся прожилками кварца. Помимо этого, в некоторых частях жил и брекчий можно наблюдать миароловые пустоты, заполненные щетками кварца. Основная масса жил практически полностью сложена мелкокристаллическим пластинчатым гематитом размером 5–50 μm. На отдельных участках можно наблюдать трещины или пустоты, которые заполнены пластинчатым гематитом более крупного размера (рис. 4). К этим же пустотам могут быть приурочены выделения барита (рис. 4 а) и редкоземельных минералов, преимущественно, монацита (рис. 4 б). Ближе к контакту с вмещающими песчаниками в гематитовой массе встречаются обломки кварца, калиевого полевого шпата и в меньшей степени

альбита, апатита, циркона, титаномagnetита. В этих участках размер пластинчатого гематита увеличивается до 100 μm, что сопоставимо с породообразующими минералами песчаника, в котором также наблюдаются отдельные крупные (до 100 μm) зерна пластинчатого гематита.

Поскольку гематитовые жилы распространены в пределах аметистового месторождения Мыс Корабль, то они пространственно сближены с кварцевыми, баритовыми и флюоритовыми жилами. На основе этого можно предположить температуры их формирования как 50–200°C (эпи/мезотермальные) при давлении не более 1 кбар. Циркуляция глубинных флюидов, скорее всего, связана с палеозойской тектоно-термальной активизацией Кандалакшского грабена и с масштабным проявлением щелочно-ультраосновного магматизма, что дает предположить возраст жил как 350–360 млн. лет.

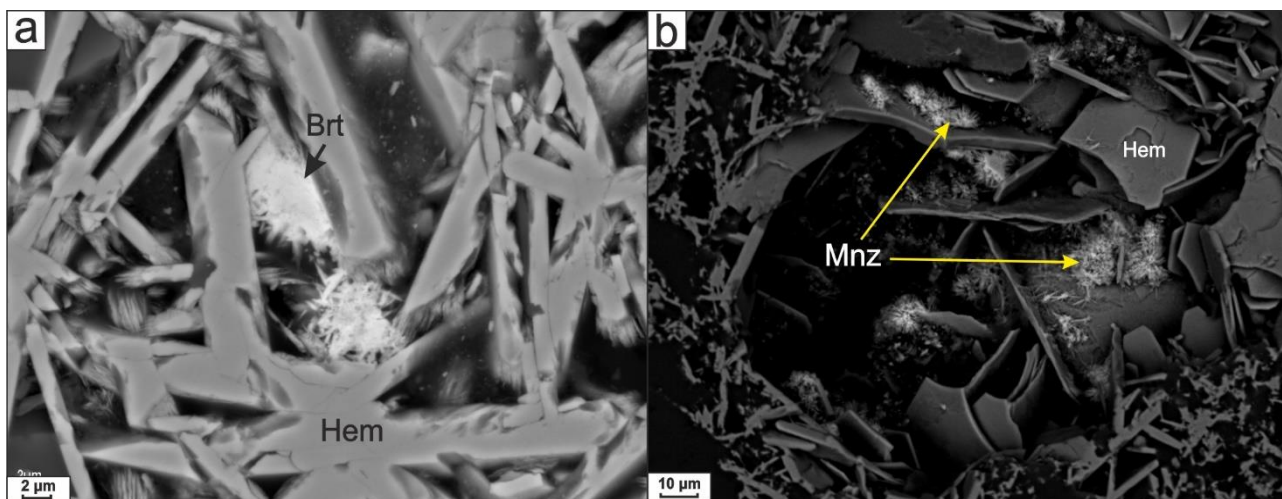


Рис. 4. Морфология пластинчатого гематита и интерстиции, заполненные выделениями барита (а) и монацита (б). BSE изображения: Brt – барит; Hem – гематит; Mnz – монацит.

[Fig. 4. Morphology of lamellar hematite and interstitium filled with barite (a) and monazite (b). BSE images: Brt – barite; Hem – hematite; Mnz – monazite.]

Методика

Анализы минералов и изображения BSE выполнены при помощи растрового электронного микроскопа Zeiss EVO-25, оснащённым рентгеновским энергодисперсионным спектрометром AZtek UltimMax-100. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 2 нА. Аналитические линии (стандарты): FeKα и SKα (пирит); AgLα (чистый металл); SbLα (чистый металл); PbMα (галенит); AsLα (InAs); CuKα (чистый металл); CoKα (чистый металл); NiKα (чистый металл).

Минералогия сульфидов и родственных им соединений в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль

В гематитовых жилах аметистового месторождения Мыс Корабль впервые обнаружены и описаны минералы халькофильных элементов (Ag, Pb, Sb, As, Hg, Cu), представленные сульфидами, сульфосолями и

сульфоарсенидами. Следует отметить, что минерализация имеет спорадический характер и выявлена в пределах нескольких небольших (первые сантиметры) участков жил.

Галенит PbS образует кристаллы кубического габитуса размером до 12 μm, заполняя свободное пространство между пластинками гематита (рис. 5 а). Состав минерала стехиометрический (табл. 1).

Минералы группы халькозина обнаружены в виде единичных зерен в ассоциации с пластинчатым гематитом и апатитом в новообразованном кварце жил и представляет собой зерна изометричной формы до 5 μm (рис. 5 б) следующего состава: Cu 72.92 мас.%, Fe 3.43 мас.%, S 22.59 мас.%. По соотношению формульных коэффициентов (Cu_{6.5}Fe_{0.4}S₄) минерал наиболее близок к анилиту Cu₇S₄ (табл. 1), а присутствие примеси Fe сближает его с дигенитом из Усть-Понойского месторождения [12].

Табл. 1. Представительные анализы сульфидов, сульфоселей и сульфоселенидов из гематитовых жил месторождения Мыс Корабль
[Table 1. Representative analyses of sulfides, sulfosalts and sulfoselenides from hematite veins Cape Korabl' deposit]

Минерал [Mineral]	Галенит [Galena]		Арсенопирит [Arsenopyrite]		Аргентополлбазит [Argentopolymbasite]			Пираргирит [Pyrrargyrite]	Гр. халькозина [Chalcocite group]
№ обр. [№ sample]	23. ТБ.о6	23. ТБ.ЖЗ.б	23. ТБ.о6	23. ТБ.о1	23. ТБ.о6	23. ТБ.ЖЗ.б	23. ТБ.о1	23. ТБ.о1	23. ТБ.ЖЗ.о6
Fe			37.82	34.78					3.43
Cu									72.92
Co			0.37	0.56					
Ni			0.13						
Ag					72.88	74.99	72.34	73.65	59.96
Pb	81.99	87.81							
Sb					9.88	9.70	10.04	10.34	23.70
As			42.20	46.16	1.19	0.30		0.94	
S	12.29	13.07	19.20	18.53	16.05	15.00	14.27	15.07	16.34
Сумма [Total]	94.28	100.88	99.72	100.03	100.00	99.99	96.65	100.00	98.94
Коэффициенты кристаллохимических формул [Crystal chemical formula coefficients]									
Fe			1.13	1.08					0.35
Cu									6.51
Co			0.01	0.02					
Ag					14.85	16.34	16.57	15.98	3.27
Pb	1.03	1.04							
Sb					1.78	1.87	2.04	1.99	1.15
As			0.94	1.07	0.35	0.09		0.29	
S	1.00	1.00	1.00	1.00	11.00	11.00	11.00	11.00	4.00

Примечание: Коэффициенты кристаллохимической формулы рассчитаны на атомы S: на 1 атом - для арсенопирита, галенита, на 11 атомов - для аргентополлбазита; на 3 атома - для пираргирита; на 4 атома - для гр. халькозина.

[Note: The coefficients of the crystal chemical formula are calculated for S atoms: 1 atom for arsenopyrite, galena; 11 atoms for argentopolymbasite; 3 atoms for pyrrargyrite; 4 atoms for chalcocite group.]

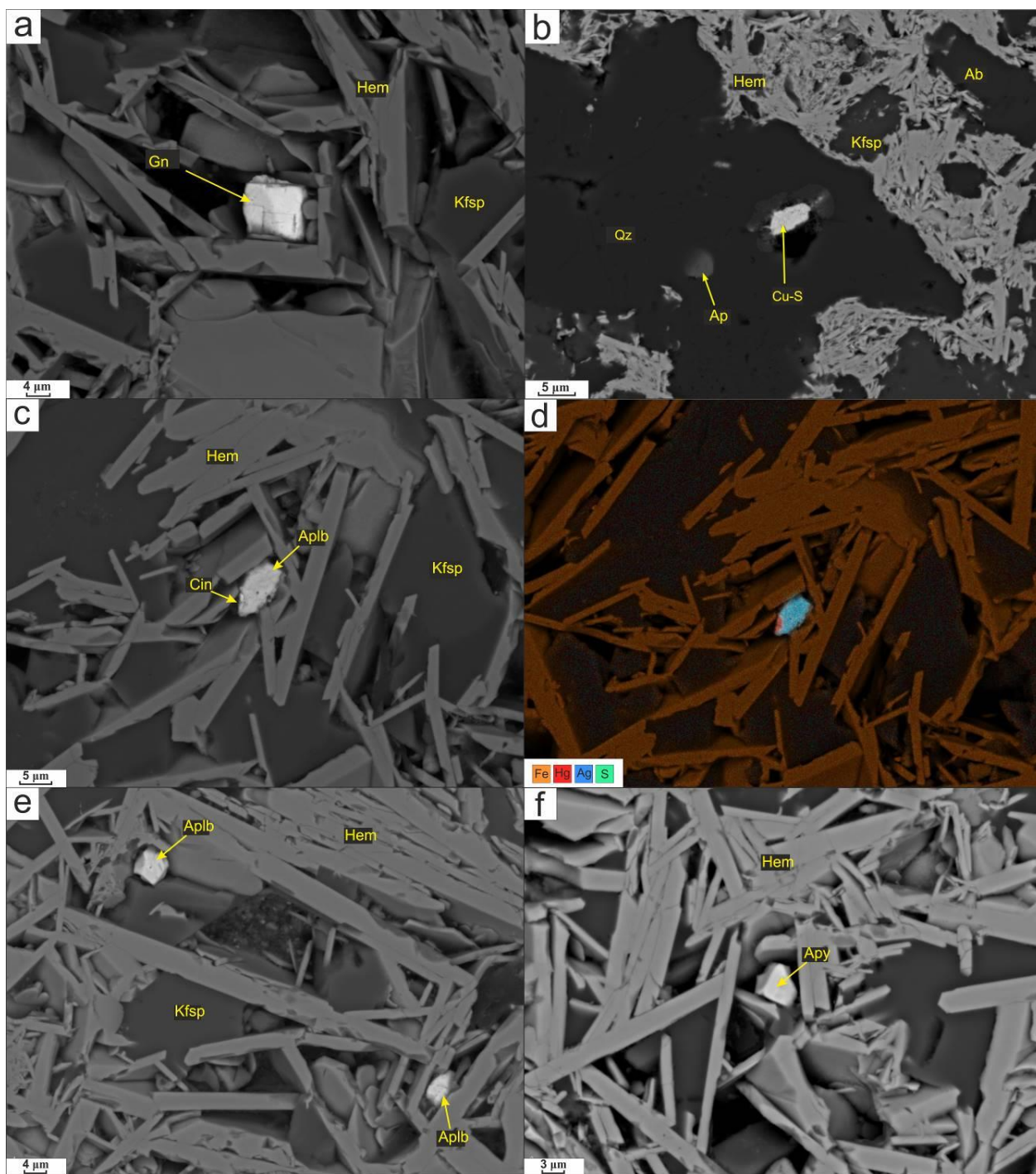


Рис. 5. Парагенезис и морфология сульфидов, сульфосолей и сульфоарсенидов (BSE изображения): *a* – галенит; *b* – фаза Cu-S; *c* – киноварь в сростании с аргентополибазитом; *d* – сводная элементная карта по Fe, Hg, Ag, S участка на рис. 5*c*; *e* – аргентополибазит; *f* – арсенопирит. Qz – кварц; Kfsp – калиевый полевой шпат; Hem – гематит; Ap – апатит; Gn – галенит; Ab – альбит; Aplb – аргентополибазит; Cin – киноварь; Apy – арсенопирит.

[**Fig. 5.** Paragenesis and morphology of sulfides, sulfosalts and sulfoarsenides (BSE images): (*a*) – galena; (*b*) – Cu-S phase; (*c*) – cinnabar intergrown with argentopolybasite; (*d*) – summary elemental map for Fe, Hg, Ag, S of the same part as on Fig. 5*c*; (*e*) – argentopolybasite; (*f*) – arsenopyrite. Qz – quartz; Kfsp – potassium feldspar; Hem – hematite; Ap – apatite; Gn – galena; Ab – albite; Aplb – argentopolybasite; Cin – cinnabar; Apy – arsenopyrite.]

Аргентополибазит $Ag_{16}Sb_2S_{11}$ один из самых распространённых минералов сульфосолей в гематитовых жилах. Встречается в виде угловатых зерен от 3 до 7 μm между пластинками гематита (рис. 5 *c*), а также калиевого полевого шпата (рис. 5 *e*). Он может содержать

примеси As (0.3–1.19 мас.%) (табл. 1). По сравнению с голотипом из Ag-Au эпитермального месторождения Кремница, Словакия [15], аргентополибазит характеризуется повышенными содержаниями Sb и пониженными As, отсутствием примесей Cu и Se. Аргенто-

полибазит из гематитовых жил Мыса Корабль является второй находкой на Кольском п-ве. Минерал впервые был обнаружен на Оленинском месторождении [16], где он находится в тесной ассоциации с галенитом, сфалеритом, фрейбергитом и другими сульфосолями и отличается относительно более низким содержанием Ag (до 70 мас.%), возможно за счет присутствия примесей Fe и Cu.

Киноварь HgS обрастает зерна сульфосолей Ag, размеры обнаруженных выделений менее 1 μm (рис. 5 с, d).

Пираргирит Ag_3SbS_3 образует ксеноморфные зерна размером до 3 μm в околожилых песчаниках, в которых присутствуют пластинки гематита, что указывает на их гидротермальный характер. По составу минерал относится к конечному члену ряда прустит-пираргирит (табл. 1). От опубликованных в литературе стехиометрически «чистых» пираргиритов [17] минерал Мыса Корабль отличается несколько повышенным содержанием Sb и пониженным S. Пираргирит гематитовых жил сходен по своему составу с минералом Оленинского месторождения [16], где он, в отличие от исследуемого проявления, находится в тесной ассоциации с галенитом, сульфосолями свинца, фрейбергитом, иногда замещается акантитом.

Арсенопирит $FeAsS$ наблюдается в виде зерен изометричной, угловатой формы до 10 μm и также как вышеперечисленные минералы заполняют пространство между пластинчатым гематитом (рис. 5 f). Состав близок к стехиометрическому с небольшой примесью Co (0.37–0.56 мас.%), Ni (0.13 мас.%) (табл. 1).

Специфической характеристикой гематитовых жил Мыса Корабль является массовая кристаллизация пластинчатого гематита, при которой в породе образуется множество пустот различной формы между его пластинками. Циркуляция остаточных гидротермальных растворов могла приводить к кристаллизации минералов халькофильных элементов в этих пустотах без видимых признаков реакционных взаимоотношений с гематитом. Аналогичная форма нахождения характерна для барита и REE минералов (рис. 4), которые характеризуются признаками свободного роста – сферулы, щетки, радиально-лучистые зерна [3].

Насколько нам известно, киноварь в Кольском регионе ранее не была описана [18]. При этом, обнаружение киновари имеет важное значение, так как указывает на низкотемпературные условия (<200 °C) кристаллизации халькофильной минерализации в гематитовых жилах.

Кристаллизация сульфоантимонитов серебра в гематитовых жилах согласуется с повышенным содержанием тяжелых халькофилов (As, Sb, Bi) во вмещающих породах (рис. 6), при этом их концентрации значительно выше, чем в околожилых и неизмененных песчаниках. В сульфосолях наблюдается непрерывный изовалентный изоморфизм As-Sb-Bi. Действительно, аргентополибазит из исследуемого проявления иногда содержит примесь мышьяка. При этом изоморфного ряда с участием Bi не обнаружено, но весьма высокие содержания этого элемента в ряде образцов могут указывать на перспективы обнаружения в жилах и висмутовых минералов.

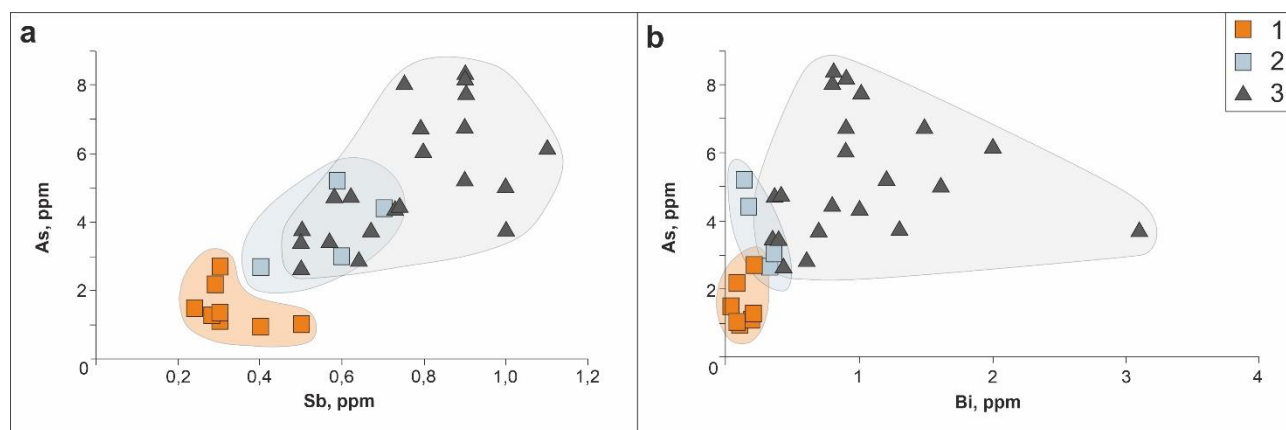


Рис. 6. Графики зависимости Sb от As (a) и Bi от As (b) для неизмененных песчаников (1), околожилых песчаников (2) и гематитовых жил (3). Концентрации элементов получены методом ICP-MS в ЦКП «ГЕОАНАЛИТИК», ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург.

[Fig. 6. Graphs of Sb vs As (a) and Bi vs As (b) for unaltered sandstones (1), wall-vein sandstones (2) and hematite veins (3). Concentrations of elements were obtained using the ICP-MS method at the “GEOANALITIK”, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg.]

В целом, халькофильная минерализация гематитовых жил Мыса Корабль имеет сходные черты по ассоциациям элементов как с жилами Кандакашского берега («серебруродная» специфика), так и с Усть-Понойскими проявлениями («меднорудная» специфика). Основными отличиями являются практически полное отсутствие в гематитовых жилах свинцово-

цинковой минерализации и самородного серебра, слабое развитие медной минерализации (обнаружены только лишь минералы группы халькозина против пяти минеральных видов меди в жилах с «меднорудной» спецификой). По нашему мнению, это, скорее всего, связано с различиями физико-химических условий формирования жил (в особенности, окисли-

тельно-восстановительного потенциала и активности железа), источников рудного вещества и состава гидротермальных растворов.

К происхождению халькофильной минерализации в гематитовых жилах месторождения Мыс Корабль

Ассоциация оксидов железа (в том числе, гематита) с сульфидами и сульфосолями наблюдается в рудах свинцово-цинковых месторождений, низкотемпературных полиметаллических гидротермальных жилах, вулканогенных колчеданных месторождениях, проявлениях современных «черных курильщиков» океанического дна [19, 20–22].

Одним из хорошо изученных проявлений сульфидно-оксидной ассоциации является Ново-Широкинское золото-свинцово-цинковое месторождение в Забайкальской рудной провинции [23], где на промежуточной гематит-пирит-кварцевой стадии развиваются гематит-пирит-кварцевый и галенит-халькопирит-теннантит-тетраэдритовый парагенезисы. На этой стадии происходило резкое изменение состава растворов и физико-химической обстановки минералообразования с изменением парциального давления серы и кислорода. М. Г. Добровольская и Т. Н. Шадлун [23] показали, что «наличие галенит-халькопиритового парагенезиса с блеклой рудой свидетельствует об устойчивости этих минералов в условиях повышения окислительно-восстановительного потенциала, сопровождавшегося появлением гематита».

Формирование необычной гематит-аргентополибазит-пираргиритовой ассоциации в гидротермальных жилах месторождения Мыс Корабль может быть объяснено следующим образом. Источником серебра мог служить обильный аутигенный гематит из порового цемента красноцветных песчаников терской свиты, который под воздействием гидротермальных растворов растворялся и переотлагался в виде стехиометрически чистого гематита. Содержание серебра в песчаниках превышает кларковые значения для земной коры в 5–10 раз (наши неопубликованные данные ICP-MS анализа). В гидротермальных условиях серебро способно мигрировать в виде растворимого Ag_2SO_4 , особенно в присутствии сульфата окиси железа и свободной серной кислоты. Присутствие барита в гематитовых жилах определяет состояние серы преимущественно в шестивалентной форме в гидротермальном растворе. При этом, $\text{Fe}_2(\text{S}^{\text{VI}}\text{O}_4)_3$ легко подвергается термическому разложению с образованием Fe_2O_3 , SO_2 и кислорода. Реакция является окислительно-восстановительной и кроме кристаллизации гематита приводит, в том числе, к восстановлению серы и в последствии может привести к образованию сульфосолей серебра с пониженной валентностью серы.

Вместе с тем, гематитовые жилы несут ряд тектурных и минералогических признаков, указывающих на развитие рудной системы по аналогии с месторождениями IOCG-типа. Железооксидные медно-золотые месторождения (IOCG) представляют собой разнообразное семейство месторождений, характер-

изующееся следующими особенностями: (1) значительная роль гидротермальных процессов в их формировании и отсутствие четкой пространственной связи с магматизмом; (2) широкое распространение брекчирования и обилие в качестве цемента и вкраплений в обломках (вмещающих породах) магнетита и/или гематита; (3) оксиды Fe имеют пониженное содержание Ti, чем в минералах из большинства магматических пород; (4) широкое распространение щелочного метасоматоза [24–26]. Кроме основных рудных минералов (Fe, Cu, Au), месторождения этого типа могут быть обогащены разнообразным набором второстепенных рудных компонентов, включая различные комбинации U, REE, F, P, Mo, Ag, Ba, Co, Ni и As. Некоторые из этих признаков можно наблюдать в рассматриваемых здесь гидротермальных образованиях месторождения Мыс Корабль, а именно, брекчирование руд и формирование обильного низко-Ti гематита, проявление калиевого метасоматоза, присутствие баритовой и редкоземельной минерализации [3, 8], формирование необычной Ag-Cu-Sb-As ассоциации сульфидов и сульфосолей.

Одним из наиболее известных и хорошо изученных IOCG месторождений является Олимпик-Дэм в южной Австралии. Установлена зональность месторождения от периферии (и вверх, от глубины) к центру с последовательной сменой минеральных парагенезисов [27]: (1) наименее измененная железооксидная зона (магнетит-апатит-сидерит-хлорит-кварц) → окисленная железооксидная зона (гематит-серицит-флюорит) → гематит-кварц-баритовая зона; (2) зона с минеральной ассоциацией сидерит → флюорит → барит (\pm минералы REE, U); (3) основная рудная зона с минеральной ассоциацией сфалерит → галенит → пирит → халькопирит - борнит → халькозин (\pm Au, U); (4) парагенетически ранняя (?) зона с бедной полиметаллической (Mo-W-Sn-As-Sb) минерализацией → богатой полиметаллической (Cu-Pb-Zn) минерализацией → бессульфидными гематит-кварц-баритовыми брекчиями в центре месторождения. Скорее всего, не учитывая различия в масштабах и специфике геохимических процессов, гидротермальные жилы и брекчии с бедной барий-фосфор-редкоземельно-халькофильной минерализацией Мыса Корабль могут соответствовать наименее глубинным и ранним зонам рудных систем IOCG-типа. Отсутствие богатой халькофильной минерализации в районе Мыса Корабль можно объяснить следующими факторами: (1) редуцированный характер развития гидротермальной системы вследствие недостаточно интенсивной тектонотермальной активизации; (2) различия в физико-химических условиях, например, иной окислительно-восстановительный режим, слабое развитие карбонатизации; (3) более богатая халькофильная минерализация находится на глубоких горизонтах.

Заключение

1. В гематитовых жилах аметистового месторождения Мыс Корабль выявлена необычная гематит-

аргентополибазит-пираргиритовая ассоциация, сформировавшаяся вследствие специфики поведения Fe-Cu-Ag-Sb-S-O системы.

2. Источником серебра в гидротермальных жилах мог служить аутигенный поровый гематит из вмещающих аркозовых песчаников терской свиты, который под воздействием гидротермальных растворов растворялся и переотлагался в виде жил практически стехиометрически чистого гематита. В гидротермальных условиях серебро способно мигрировать в виде растворимого Ag_2SO_4 , особенно в присутствии сульфата окиси железа. Разложение последнего приводило к восстановлению серы, что, в свою очередь, могло способствовать образованию имеющих пониженную валентность серы сульфосолей серебра.

3. Развитие рудной системы в гематитовых жилах сходно с месторождениями IOCG-типа. На это указывают такие признаки как: брекчирование руд и формирование обильного низко-Ti гематита, проявление калиевого метасоматоза, присутствие баритовой и редкоземельной минерализации, формирование Ag-Cu-Sb-As ассоциации сульфидов и сульфосолей.

Благодарности: Авторы признательны ведущему научному сотруднику ГИ КНЦ РАН А. А. Калинину за ценные методические советы на стадии подготовки рукописи, а также рецензенту д.г.-м.н., профессору ВГУ К. А. Савко за замечания по структуре и содержанию работы, способствующие повышению ее качества.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин А. Г. О влиянии режима серы и кислорода на парагенетические соотношения минералов в рудах // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1949. № 3. С. 3–26.
- Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 122–275.
- Соловьева А.Н., Зозуля Д.Р., Савченко Е.Э. Гидротермальные гематитовые жилы и брекчии с редкоземельной минерализацией аметистового месторождения Мыс Корабль (Кольский регион) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 4. С. 75–90. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>.
- Токарев В.А. К минералогии Терского берега Кольского полуострова // *Труды Ленинградского общества естествоиспытателей.* Т. 65. Вып. 1. 1935. С. 55–88.
- Федотова М.Г. Каледонская жильная минерализация мурманского и беломорского побережий Кольского полуострова. ГИ КНЦ АН СССР, Апатиты, 1990. 32 с.
- Максимов М.М. Очерк о серебре. Москва: Изд-во Недра. 1981. 206 с.
- Фришман Н.И. Геолого-тектонические условия формирования и генезис месторождения аметиста «Мыс Корабль» (Мурманская область) // *Геология и разведка.* 2001. № 5. С. 156–158.
- Зозуля Д.Р., Соловьева А.Н., Чикирёв И.В. Уникальные гематитовые жилы Терского побережья, Кольский регион: состав, структурно-текстурные особенности и генезис. *Труды Ферсмановской научной сессии.* Апатиты: ГИ КНЦ РАН. №.18, 2021. С. 177–182.
- Окулов А. В., Кузина И. Н. Аметисты Терского берега из археологических раскопок в Великом Новгороде // *Отечественная геология.* № 6. С. 50–63.
- Куценко Е. П. Типы месторождений аметиста и его ресурсы. Драгоценные камни как полезное ископаемое. М.: Наука, 1973. С. 155–165.
- Балуев А. С., Журавлев В. А., Терехов Е. Н., Пржиялговский Е. С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1500000). Отв. ред. М. Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2012. 104 с.
- Калинин А. А. Минералогия сульфидного оруденения гидротермальных образований Усть-Понойской зоны. Труды Ферсмановской научной сессии: Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2011. №. 8. С. 64–77.
- Геологическая карта Кольского полуострова. Масштаб: 1:2000000. Гл. ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2001.
- Фришман Н. И. Аметистовый берег. СПб.: Русская коллекция, 2007. 96 с.
- Števkó M., Mikuš T., Sejkora J., Plášil J., Makovický E., Vlasáč J. And Kasatkin A. Argentopolybasite, $\text{Ag}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$, a new member of the polybasite group // *Mineralogical Magazine.* 2023. Vol. 87. P. 382–395. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.141>
- Калинин А. А., Савченко Е. Э., Прокофьев В. Ю. Минералогия и особенности генезиса месторождения золота Оленинского (Кольский полуостров). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2021. 162 с. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.446.4>.
- Bindi L., Pratesi G., Spry P.G. Crystallographic and chemical constraints on the nature of the proustite–pyrrargyrite solid-solution series // *American Mineralogist.* 2010. Vol. 95. P. 1725–1729. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3563>.
- Борисова В. В., Волошин А. В. Перечень минеральных видов Кольского региона. Изд. 5-е, испр. и доп. Апатиты: Изд-во K&M, 2015. 124 с.
- Ковалев К. Р., Гасков И. В., Акимцев Б. А. Колчеданное рудообразование древних вулканических областей и современных спрединговых зон. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1993. 63 с.
- Контарь Е. С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы). Екатеринбург: УГГУ, 2013. 199 с.
- Мозгова Н. Н., Бородаев Ю. С., Степанова Т. В., Черкашев Г. А., Успенская Т. Ю. Сульфидно-окисидные ассоциации минералов как показатель режима серы и кислорода в современных подводных колчеданах. Новые данные о минералах. Москва. №. 45. 2010. С. 91–100.
- Смирнов С. С. Полиметаллические месторождения и металлогения Восточного Забайкалья. М.: АН СССР, 1961. 507 с.
- Добровольская М. Г., Шадлун Т. Н. Минеральные ассоциации и условия формирования свинцово-цинковых руд. М.: Наука, 1974. 273 с.
- Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits // *Precamb. Res.* 1992. Vol. 58. P. 241–287.
- Williams P. J., Barton M. D., Johnson D. A., Fontboté L., de Haller A., Mark G., Oliver N. H. S., Marschik R. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distributions, and possible modes of origin // *Econ. Geol.* 2005. Vol. 100. P. 371–405.
- Skirrow R. G. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification // *Ore Geology Reviews.* 2022. Vol. 140. 104569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>.
- Ehrig K. J., McPhie J., Kamenetsky V. S., Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. In: Hedenquist, J. W., Harris, M., Camus, F. (Eds.), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe.* Special Publication 16. *Society of Economic Geologists*, 2012. P. 237–267. <https://doi.org/10.5382/sp.17>

Chalcophile mineralization in hematite veins of the Cape Korabl' amethyst deposit (Kola peninsula): sequences for the formation of Fe (Cu,Ag)-S-O parageneses

©2024 A. N. Solovjova[✉], D. R. Zozulya, Ye. E. Savchenko, E. S. Borisenko

*Geological Institute of the KSC RAS, Fersman str., 14,
184209, Apatity, Murmansk region, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the article presents data on the unusual Fe-Cu-Ag-Sb-S-O paragenesis of hematite veins of the Cape Korabl' amethyst deposit. These bodies can be attributed to a series of fluorite-barite-quartz-carbonate veins, widespread in the northern side of the Kandalaksha graben. The study of parageneses of Fe-S-O and Fe-Cu-S-O systems is of great importance, since their behavior determines many patterns of metal distribution in deposits.

Methodology: to study the composition of minerals, a scanning electron microscope Zeiss EVO-25 with an energy-dispersive analyzer Aztec UltimMax-100 (Center for Common Use of the KSC RAS, Apatity) was used.

Results and discussions: chalcophile mineralization is represented by sulfides (galena, cinnabar, chalcocite group), silver sulfosalts (argentopolybasite, pyrargyrite) and sulfoarsenides (arsenopyrite). The minerals are closely associated with hydrothermal lamellar hematite. Mineral parageneses indicate low-temperature (<200°C) conditions of their formation. The authors proposed a mechanism for the crystallization of this mineralization during changes in the redox potential in the Fe-S-O system.

Conclusion: the source of silver in hydrothermal veins could be authigenic pore hematite from the host arkosic sandstones of the Tersky suite, which, under the influence of hydrothermal solutions, was dissolved and redeposited in the form of almost stoichiometrically pure hematite with the release of silver into the hydrothermal solution.

Keywords: Cape Korabl' deposit; hematite veins; chalcophile mineralization; hydrothermal conditions.

For citation: Solovjova A. N., Zozulya D. R., Savchenko Ye. E., Borisenko E. S. Chalcophile mineralization in hematite veins of the Cape Korabl' amethyst deposit (Kola peninsula): sequences for the formation of Fe(Cu,Ag)-S-O parageneses // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 3, pp. 48-59. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/48-59>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Betekhtin A. G. O vliyanií rezhima sery i kisloroda na parageneticheskie sootnosheniya mineralov v rudakh [On the influence of the sulfur and oxygen regime on the paragenetic relationships of minerals in ores]. *Izvestiya AN SSSR Seriya Geologiya – Izvestia of the USSR Academy of Sciences Geology Series*, 1949, no. 3, pp. 3–26 (In Russ.)
2. Betekhtin A. G. *Gidrottermal'nye rastvory, ih priroda i processy rudoobrazovaniya* [Hydrothermal solutions, their nature and ore formation processes]. *Osnovnye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyah* [The main problems in the

study of magmatic ore deposits]. Moscow, AN SSSR publ., 1953, pp. 122–275 (In Russ.)

3. Solovjova A.N., Zozulya D.R., Savchenko Ye. E. Hydrothermal hematite veins and breccias with rare earth elements mineralization at the Cape Korabl' amethyst deposit (Kola region). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 75–90. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/75-90>. (In Russ.)

4. Tokarev V.A. Contribution to the mineralogy of the Tersky-coast of the Kola peninsula. *Trudy Leningradskogo obshchestva estestvoispytatelej – Proceedings of the Leningrad Society of*



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Anna N. Solovjova, e-mail: a.soloveva@ksc.ru

Naturalists, 1935, Vol. 65, no. 1, pp. 55–88. (In Russ.)

5. Fedotova M.G. Kaledonskaya zhi'l'naya mineralizatsiya mur-manskogo i belomorskogo poberezh'ya Kol'skogo poluostrova: preprint [Caledonian vein mineralization of the Murmansk and White Sea coasts of the Kola Peninsula: preprint]. Apatity: GI KSC AN SSSR, 1990, 32 p.
6. Maksimov M.M. Ocherk o serebre [Essay on silver]. Moscow: Nedra, 1981, 206 p. (In Russ.)
7. Frishman N.I. Geologo-tektonicheskie usloviya formirovaniya i genezis mestorozhdeniya ametista «Mys Korabl'» (Murmanskaya oblast') [Geological and tectonic conditions of formation and genesis of the "Cape Korabl'" amethyst deposit (Murmansk region)]. *Geologiya i razvedka – Geology and exploration*, 2001, no. 5, pp. 156–158 (In Russ.)
8. Zozulya D.R., Solovjova A.N., Chikiryov I.V. Unikal'nye gematitovye zhily Terskogo poberezh'ya, Kol'skii region: sostav, strukturno-teksturnye osobennosti i genezis [Unique hematite veins of Tersky Coast, Kola region: composition, structural-textural features and genesis]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN [Proceeding of Fersman scientific session of GI KSC RAS]*, Apatity, GI KSC RAS publ., 2021, vol. 18, pp. 177–182 (In Russ.)
9. Okulov A. V., Kuzina I. N. Tersky coast amethysts from archaeological excavations in Veliky Novgorod. *Otechestvennaya geologiya – Domestic geology*, 2019, no 6, pp. 50–63 (In Russ.)
10. Kucenko E. P. *Tipy mestorozhdenij ametista i ego resursy. Dragocennye kamni kak poleznoe iskopaemoe* [Types of amethyst deposits and its resources. Precious stones as a mineral]. Moscow, Nedra publ., 1973, pp. 155–165 (In Russ.)
11. Baluev A. S., ZHurvlev V. A., Terekhov E. N., Przhialgovskij E. S. *Tektonika Belogo morya i prilgayushchih territorij (Ob'yasnitel'naya zapiska k «Tektonicheskoy karte Belogo morya i prilgayushchih territorij» masshtaba 1:1500000)* [Tectonics of the White Sea and adjacent territories (Explanatory note to the "Tectonic map of the White Sea and adjacent territories" scale 1:1500000)]. Moscow, GEOS publ., 2012, 104 p. (In Russ.)
12. Kalinin A. A. Mineralogiya sul'fidnogo orudneniya gidrotermal'nykh obrazovaniy ust'-ponojskoj zony [Mineralogy of sulphide mineralization of hydrathermal formations of the ust'-ponoy zone]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN* [The work of the GI KSC RAS], Apatity, GI KSC RAS publ., 2011, vol. 8, pp. 64–77 (In Russ.)
13. *Geologicheskaya karta Kol'skogo poluostrova. Masshtab: 1:2000000* [Geological map of the Kola Peninsula. Scale: 1:2000000]. Apatity, GI KSC RAS. 2001]. Apatity, GI KSC RA publ., 2001 (In Russ.)
14. Frishman N. I. *Ametistovyi bereg* [Amethyst Coast]. Saint Petersburg, Russian collection publ., 2007, 96 p. (In Russ.)
15. Števko M., Mikuš T., Sejkora J., Plášil J., Makovický E., Vlasáč J. And Kasatkin A. Argentopolybasite, Ag₁₆Sb₂S₁₁, a new member of the polybasite group. *Mineralogical Magazine*, 2023, vol. 87, pp. 382–395. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.141>
16. Kalinin A. A., Savchenko E. E., Prokof'ev V. YU. *Mineralogiya i osobennosti genezisa mestorozhdeniya zolota Oleninskogo (Kol'skij poluostrov)* [Mineralogy and features of the genesis of the Oleninsky gold deposit (Kola Peninsula)]. Apatity, FIC KSC RAS publ., 2021, 162 p. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.446.4>. (In Russ.)
17. Bindi L., Pratesi G., Spry P. G. Crystallographic and chemical constraints on the nature of the proustite–pyrrargyrite solid-solution series. *American Mineralogist*, 2010, vol. 95, pp. 1725–1729. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3563>.
18. Borisova V. V., Voloshin A. V. *Perechen' mineral'nykh vidov Kol'skogo regiona* [List of mineral species of the Kola region. Ed. 5th, rev. and additional]. Apatity, K&M publ., 2015, 124 p. (In Russ.)
19. Kovalev K. R., Gas'kov I. V., Akimcev B. A. *Kolchedannoe rudoobrazovanie drevnih vulkanicheskikh oblastej i sovremennykh spredingovykh zon* [Pyrite ore formation of ancient volcanic areas and modern spreading zones]. Novosibirsk, SO RAN NIC OIGGM publ., 1993, 63 p. (In Russ.)
20. Kontar' E. S. *Geologo-promyshlennye tipy mestorozhdenij medi, cinka, svince na Urale (geologicheskie usloviya razmeshcheniya, istoriya formirovaniya, perspektivy)* [Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects)]. Ekaterinburg, UGUU publ., 2013, 199 p. (In Russ.)
21. Mozgova N. N., Borodaev Yu. S., Stepanova T. V., Cherkashev G. A., Uspenskaya T. Yu. *Sul'fidno-oksidnye assotsiatsii mineralov kak pokazatel' rezhima sery i kisloroda v sovremennykh podvodnykh kolchedanakh. Novye dannye o mineralakh* [Sulfide-oxide associations of minerals as an indicator of the sulfur and oxygen regime in modern submarine pyrites. New data on minerals]. Moscow publ., no. 45, 2010, pp. 91–100 (In Russ.)
22. Smirnov S. S. *Polimetallicheskie mestorozhdeniya i metallogeniya Vostochnogo Zabajkal'ya* [Polymetallic deposits and metallogeny of Eastern Transbaikalia]. Moscow, Akademiya nauk SSSR publ., 1961, 507 p. (In Russ.)
23. Dobrovolskaya M. G., SHadlun T. N. *Mineral'nye assotsiatsii i usloviya formirovaniya svincovo-cinkovykh rud* [Mineral associations and conditions for the formation of lead-zinc ores]. Moscow, Nauka publ., 1974, 273 p. (In Russ.)
24. Hitzman M. W., Oreskes N., Einaudi M. T. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precamb. Res.*, 1992, vol. 58, pp. 241–287.
25. Williams P. J., Barton M. D., Johnson D. A., Fontboté L., de Haller A., Mark G., Oliver N. H. S., Marschik R. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distributions, and possible modes of origin. *Econ. Geol.*, 2005, vol. 100, pp. 371–405.
26. Skirrow R. G. Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 140, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104569>.
27. Ehrig K. J., McPhie J., Kamenetsky V. S. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. In: Hedenquist J. W., Harris M., Camus F. (Eds.), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Special Publication 16. *Society of Economic Geologists*, 2012, pp. 237–267. DOI: <https://doi.org/10.5382/sp.17>

Соловьева Анна Николаевна, инженер 2 кат., аспирант, Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, РФ; e-mail: a.soloveva@ksc.ru; ORCID 0009-0004-0156-1341

Зозуля Дмитрий Ростиславович, к.г.-м.н., в.н.с., Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, РФ; e-mail: d.zozulya@ksc.ru; ORCID 0000-0003-2846-5865

Савченко Евгений Элланович, н.с., Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, РФ; e-mail: ye.savchenko@ksc.ru; ORCID 0000-0002-5639-1907

Борисенко Елена Сергеевна, м.н.с., Геологический институт Кольского научного центра, Апатиты, РФ; e-mail: e.borisenko@ksc.ru; ORCID 0000-0003-0267-9064

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Anna N. Solovjova, Engineer 2nd category, Post-Graduate Student, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, RF; e-mail: a.soloveva@ksc.ru; ORCID 0009-0004-0156-1341

Dmitry R. Zozulya, PhD in Geol.-Min., Leading Researcher, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, RF; e-mail: d.zozulya@ksc.ru; ORCID 0000-0003-2846-5865

Evgeniy El. Savchenko, Researcher, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russian Federation; e-mail: ye.savchenko@ksc.ru; ORCID 0000-0002-5639-1907

Elena S. Borisenko, Research fellow, Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russian Federation; e-mail: e.borisenko@ksc.ru; ORCID 0000-0003-0267-9064

All authors have read and approved the final manuscript.