Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. 22. С. 106–114

Процессы замещения минералов серебра и меди в рудах Оленинского золото-серебряного месторождения (пояс Колмозеро-Воронья)

Калинин А. А., **Савченко Е. Э.**
Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, a.kalinin@ksc.ru; ye.savchenko@ksc.ru

Аннотация. Процессы замещения самородного серебра и халькопирита наложенными минералами на Оленинском месторождении отмечены в наиболее поздних метасоматических образованиях – в кварцевых метасоматитах, Самородное серебро и халькопирит замещаются мелкозернистым агрегатом акантита и гессита (в том числе серосодержащего), а интерстиции между зернами сульфидов и теллуридов серебра выполнены кварцем и «горчичным серебром». Установлено три вида «горчичного серебра»: 1 – с кислородными соединениями Al, Ag, Pb, P, As, Fe, S, Sb, Te; 2 – с кислородными соединениями, галогенидами (Cl, Br) серебра и с углеродистым веществом; 3 – серебро только с галогенами хлором и бромом, без кислорода и углерода. Впоследствии по рассматриваемым агрегатам развивалась кайма позднего акантита, а вокруг зерен халькопирита – каймы, состоящие из акантита и ковеллина. Предполагается формирование минерализации сульфидов и теллуридов серебра в гипогенных условиях при дефиците кислорода при участии восстановленных растворов, богатых хлором и теллуром.

Ключевые слова: пояс Колмозеро-Воронья, Оленинское золото-серебряное месторождение, самородное серебро, акантит, гессит, халькопирит.

Replacement of silver and copper minerals in the Oleninskoe gold-silver deposit

Kalinin A. A., **Savchenko Ye. E.**
Geological Institute, Kola science Centre, Russian Academy of Sciences

Abstract. In the Oleninskoe deposit, secondary minerals form after native silver and chalcopyrite in quartz metasomatic rocks. Native silver and chalcopyrite are replaced by hessite, sulfur-rich hessite, and acanthite, which form fine-grained aggregates. Interstitions in the aggregates are filled with quartz and “mustard silver” (silver analogue of mustard gold). Three main kinds of mustard silver are distinguished: 1 – gold and silver with oxides of Fe, Pb, Sb, and other metals; 2 – gold and silver with oxides, halogenides (O, Ag, Sb, Au, Br, Cl, S, ±Fe, As), and carbonaceous matter (C); 3 – gold and silver with halogenides (Cl, Br). Later the aggregates of silver sulfides and tellurides were rimmed with late acanthite, and chalcopyrite grains – with acanthite-covellite intergrowths. Secondary sulfides and tellurides, «mustard silver” formed after silver and chalcopyrite under hypogenic conditions, with low-temperature reduced chloride hydrothermal solutions, rich in tellurium.

Keywords: Kolmozero-Voronya greenstone belt, Oleninsloe gold-silver deposit, native silver, acanthite, hessite, chalcopyrite.

Введение

Золото-серебряное месторождение Оленинское расположено в северо-западной части Воронье-Колмозерского зеленокаменного пояса. Детально геологическое строение месторождения описано в (Галкин, 2006; Калинин и др., 2021 б и др.). Данное месторождение рассматривается как эпитермальное метаморфизованное: оно представляет собой часть архейской Пеллапахк-Оленинской порфирово-эпитермальной системы, которая включает также медно-молибден-порфировое рудопроявление Пеллапахк (Калинин и др., 2021 а, б; Kalinin, Kudryashov, 2021).

Как было показано ранее (Калинин и др., 2021 а, б; Kalinin, Kudryashov, 2021 и др.), минерализация серебра на месторождении контролируется участками развития наиболее поздних метасоматических образований – турмалин-арсенопирит-кварцевых и кварцевых метасоматитов (рис. 1). Турмалин-арсенопирит-кварцевые метасоматиты наложены на скарноиды, биотитовые и мусковит-альбит-кварцевые метасоматиты в зонах контакта силлов гранит-порфиров с вмещающими изме-

ненными амфиболитами. Кварцевые метасоматиты проявлены локально и образуют эллипсоидальной формы обособления в мусковит-альбит-кварцевых метасоматитах по гранит-порфирам (рис. 1).

В турмалин-арсенопирит-кварцевых метасоматитах серебро встречается преимущественно в сплавах с золотом и в соединениях с сурьмой – в виде сульфосолей с Pb и Cu и дискразита. Для кварцевых метасоматитов характерны серебро самородное и серебро в сплавах с золотом, сульфиды (акантит) и теллуриды (гессит, кервеллеит) серебра (Калинин и др., 2021 б).

Породы месторождения были регионально метаморфизованы дважды (в неоархее и в палеопротерозое) в условиях нижней части амфиболитовой фации, и прорваны секущими жилами редкометалльных (Li-Cs) пегматитов. Как результат длительной многостадийной истории образования и преобразования руд месторождения в составе минерализации сформировались несколько генераций главных сульфидов (три генерации у арсенопирита, пирротина, халькопирита, две у сфалерита – Калинин и др., 2021 б), а также образовался комплекс поздних, наложенных минералов, которые рассматриваются в настоящей статье.

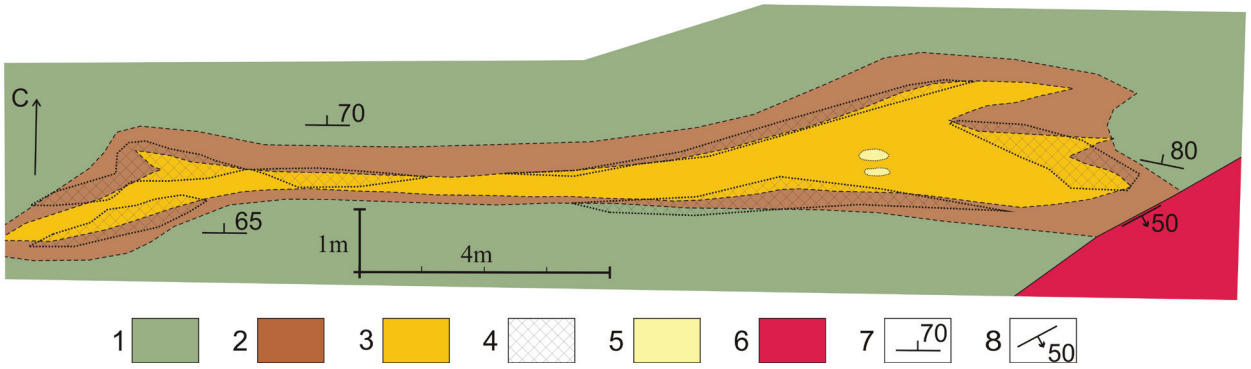

Рис. 1. Схема зональности метасоматических пород в одной из рудных линз месторождения Оленинское по результатам документации полотна канавы: 1 – слабоизмененные и диопсидизированные амфиболиты; 2 – биотитизированные амфиболиты и биотит-плагиоклаз-кварцевые породы; 3 – мусковит-альбит-кварцевые метасоматиты; 4 – турмалин-арсенопирит-кварцевые метасоматиты; 5 – кварцевые метасоматиты; 6 – пегматиты; 7 – сланцеватость пород; 8 – контакт пегматитовой жилы

Fig. 1. Scheme of zoning in one of ore lenses in the Oleninskoe deposit, logging of the trench: 1 – unaltered amphibolite and diopside metasomatite; 2 – biotite metasomatite after amphibolite; 3 – quartz-albite-muscovite metasomatite; 4 – quartz-arsenopyrite-tourmaline metasomatite; 5 – quartz metasomatite; 6 – pegmatite vein; 7 – schistosity of the rocks; 8 – pegmatite vein contact

Материалы и методы исследований

Материал для исследований собран авторами в ходе полевых работ в северо-западной части Воронье-Колмозерского зеленокаменного пояса в 2023 и 2017 гг. Коллекция включает протолочные пробы горных пород, отобранные из коренных пород в обнажениях и поверхностных горных выработках, образцы и сколки на шлифы и аншлифы, а также материал из керна скважин, пробуренных компаниями Блэк Фокс и Воронья Минералз. Из шлиховых концентратов протолочных проб и проб перекрывающих рудоносные породы рыхлых отложений были изготовлены искусственные аншлифы.

Исследования фазовой и внутрифазовой неоднородности минеральных индивидов, изучение химического состава минералов осуществлялось методами оптической и электронной микроскопии в Лаборатории физических исследований пород руд и минералов в ГИ КНЦ РАН (зав. лабораторией канд. геол.-минерал. наук Е. А. Селиванова).

Минералогические и петрографические исследования были выполнены с помощью оптического микроскопа Axioplan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете. Химический анализ (или оценка состава при малых размерах зёрен) минералов проводился при помощи энергодисперсионного рентгеновского спектрометра UltimMax-100

(Oxford Instruments), установленного на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450 (Carl Zeiss) в программе AZtec. Параметры работы прибора следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного зонда 2 нА, время накопления спектров 50–100 сек. При анализе сульфидов и интерметаллидов были использованы следующие аналитические линии (и эталонные вещества): PbMα и TeLα (PbTe) (иногда для TeLα использовался HgTe), BiMα и SeLα (Bi_2Se_3), AsKα (InAs), AgLα (металл), AuMα (металл), FeKα и SKα (пирит) (иногда для анализа FeKα использовался гематит, а для SKα – целестин), NiKα (металл), CoKα (металл), CuKα (металл), ZnKα (сфалерит), BrKα (KBr), ClKα (атакамит), CdLα (металл или CdSe), SbLα (металл), CKα (кальцит), OKα (кварц), MgKα (форстерит), AlKα ($Y_3Al_5O_{12}$), SiKα (волластонит), PKα (апатит), ClKα (атакамит), KKα (ортоклаз), CrKα (хромит), BrKα (KBr).

Результаты исследований

Состав рудной минерализации в кварцевых метасоматитах отличается от других метасоматических пород месторождения тем, что здесь снижается содержание главных сульфидов арсенопирита и пирротина, а также галенита, сфалерита, сульфосолей Ag, Pb, Cu, но несколько возрастает содержание халькопирита и минералов ряда золото-серебро, появляются пирит, теллуриды серебра гессит и кервеллеит. Минералы ряда золото-серебро представлены высокосеребряными членами ряда (менее 40 мас. % золота), многие зерна следует классифицировать как самородное серебро (до 10 мас. % Au). Халькопирит в кварцевых метасоматитах относится к поздней генерации и часто содержит примесь серебра.

Зерна самородного серебра замещаются мелкозернистым агрегатом, в состав которого кроме серебра входят сульфид серебра акантит, теллурид серебра гессит (рис. 2).

Размер зерен минералов в таких агрегатах меньше 10 мкм, зерна гессита гипидиоморфные округлые, других минералов – ксеноморфные. Пространство между зернами сульфидов и теллуридов серебра выполнено кварцем и ультратонкозернистым материалом, состоящим из самородного серебра, кислородсодержащих соединений разных элементов, хлоридов серебра, углеродистого вещества (рис. 2, 3). По аналогии с горчичным золотом это образование можно назвать «горчичным серебром».

Таблица 1. Химический состав «горчичного серебра» из месторождения Оленинского, в % атомных количеств

Table 1. Chemical composition of «mustard silver», at. %

Элемент	С кислородными соединениями			С углеродистым веществом				С хлоридами		
C	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	38.6	51.8	54.8	53.1	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
O	49.2	41.5	54.8	16.8	16.0	16.5	12.9	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Mg	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Al	н.п.о.	н.п.о.	0.9	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Si	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
P	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
S	1.5	3.7	4.6	2.3	1.7	1.0	0.8	н.п.о.	н.п.о.	0.7
K	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Cl	1.7	1.5	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.4	0.4	24.1	25.4	20.4
Cr	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Fe	8.4	6.3	12.1	н.п.о.	0.1	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.4
As	2.2	1.6	4.2	0.3	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.9	1.1
Br	н.п.о.	0.4	н.п.о.	0.6	0.5	1.6	4.6	н.п.о.	1.3	0.5
Ag	17.1	28.9	14.2	39.4	28.1	24.0	26.3	75.9	72.4	77.0
Sb	2.2	1.8	0.6	1.2	1.0	0.9	1.3	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Te	9.8	7.3	0.7	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Au	5.0	5.2	3.1	0.9	0.8	0.9	0.8	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Pb	2.7	1.8	4.8	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.

Примечание: н.п.о. – содержание ниже предела обнаружения элемента.

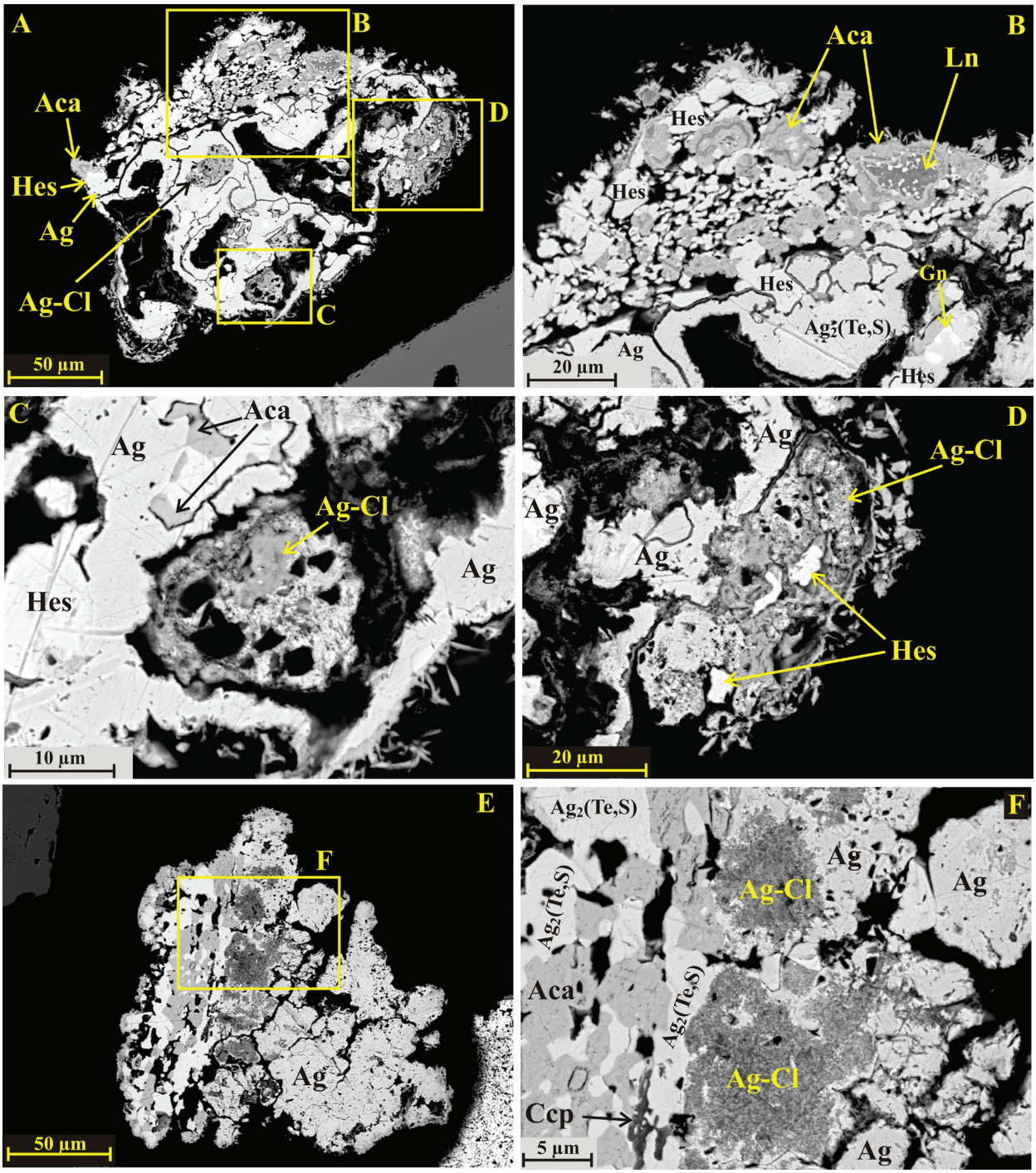

Рис. 2. Замещение самородного серебра агрегатом акантита, гессита и «горчичного серебра». Фотографии в обратно-рассеянных электронах: Aca – акантит; Ccp – халькопирит; Hes – гессит; Ln – ленаит

Fig. 2. Replacement of native silver with acanthite-hessite-«mustard silver»: aggregate. BSE images: Aca – acanthite; Ccp – chalcopyrite; Hes – hessite; Ln – lenaite

«Горчичное серебро» установлено трех разных видов. Это может быть серебро в смеси с кислородными соединениями Al, Ag, Pb, P, As, Fe, S, Sb, Te (элементы перечислены в порядке уменьшения атомных количеств). Кроме того, выявлено серебро в смеси с кислородными соединениями Sb, Au, S, Fe, As, с галогенидами (Br, Cl) серебра и с углеродом (C). Содержание углерода в этом типе «горчичного серебра» составляет до 50 ат. %, а отношение C/O в атомных процентах составляет от 2 до 5 (табл. 1). Из этого можно сделать вывод. что углерод находится в форме углеродистого вещества, а не карбонатов. Отмечено также «горчичное серебро» с галогенами хлором и бромом,

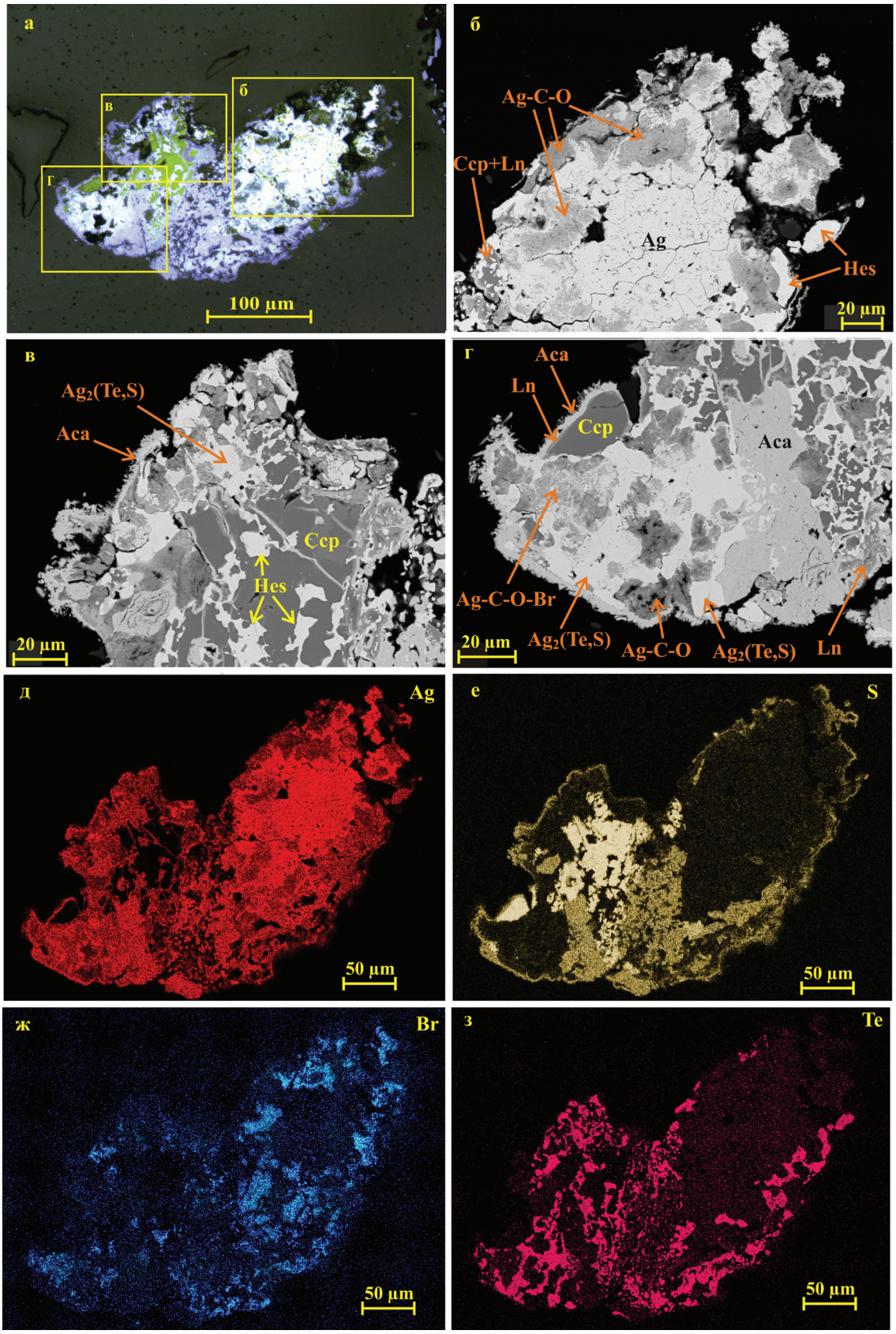

Рис. 3. Развитие агрегата акантита, гессита, серосодержащего гессита и «горчичного серебра» по самородному серебру и халькопириту: а–г – изображения в обратно-рассеянных электронах; д–з – в характеристических лучах Ag, S, Br и Te. Aca – акантит; Ccp – халькопирит; Hes – гессит; Ln – ленаит

Fig. 3. Substitution of native silver with acanthite, hessite, sulfur-rich hessite and «mustard silver»: a–г – BSE-images; д–з – images in characteristic rays of Ag, S, Br, and Te. Aca – acanthite; Ccp – chalcopyrite; Hes – hessite; Ln – lenaite

без кислорода – (Ag, Cl, Br, ± As, Fe, S). Отношение серебра к сумме галогенов Ag/(Cl+Br) примерно 3/1 (в ат. %), это отношение позволяет оценит примерные доли самородного серебра и хлоридов в составе «горчичного серебра».

В отдельно взятом мелкозернистом агрегате присутствует «горчичное серебро» только одного типа, хотя соотношение элементов в разных его выделениях в пределах данного агрегата изменяется.

Такие же мелкозернистые агрегаты, состоящие из самородного серебра, акантита, гессита, серосодержащего гессита и «горчичного серебра», развиваются по серебросодержащему халькопириту, находящемуся в срастании с самородным серебром (рис. 3), и по отдельным зернам этого минерала (рис. 4).

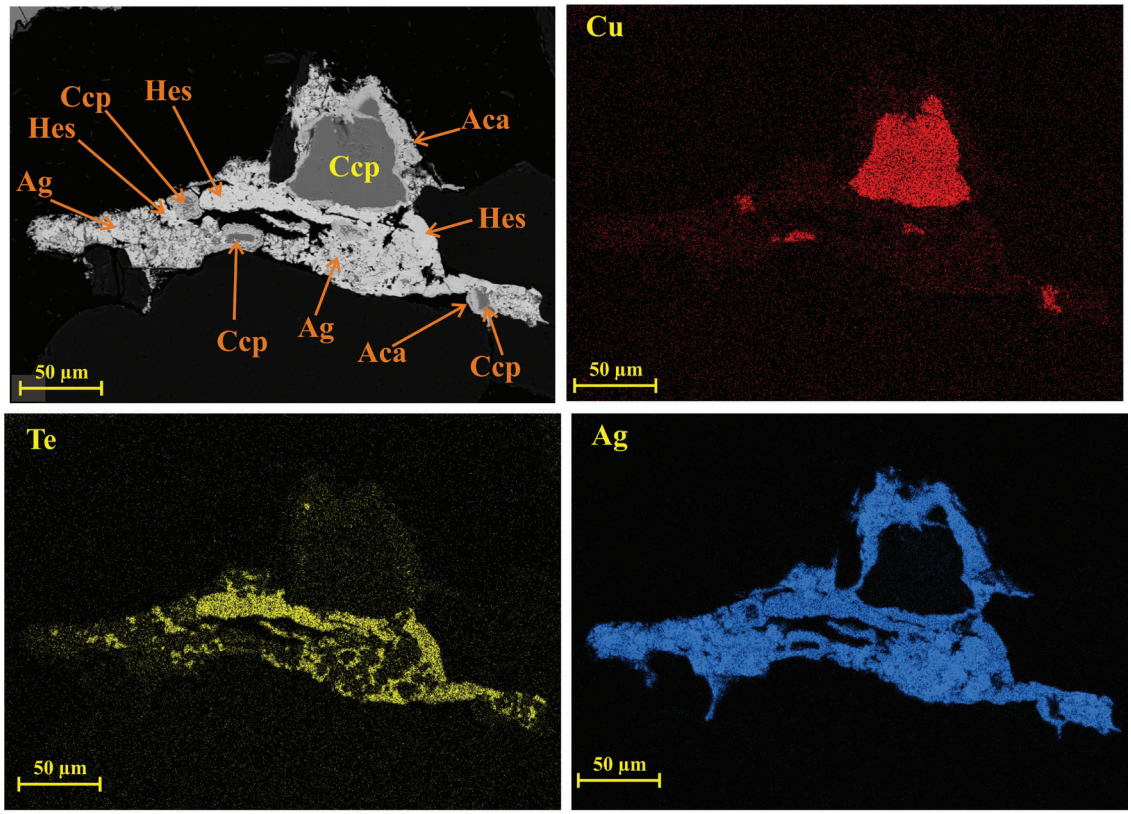

Рис. 4. Развитие агрегата акантита, гессита и «горчичного серебра» по халькопириту: изображение в обратнорассеянных электронах и в характеристических лучах Cu, Te, Ag; Aca – акантит; Ccp – халькопирит; Hes – гессит
Fig. 4. Substitution of chalcopyrite with acanthite, hessite, sulfur-rich hessite and «mustard silver»: BSE-image and images in characteristic rays of Cu, Te, Ag; Aca – acanthite; Ccp – chalcopyrite; Hes – hessite; Ln – lenaite

В последнем случае в составе агрегата не отмечено «горчичное серебро». Следует отметить, что в некоторых сохранившихся выделениях халькопирита на границе с акантитом развивается кайма ленаита, в редких случаях ленаит замещает халькопирит полностью (рис. 3, 4).

На изображениях описываемого мелкозернистого агрегата гессита, акантита, самородного серебра, халькопирита и «горчичного серебра, в частности, на изображениях в характеристических лучах серы (рис. 3), видно, что акантит образует также тонкую кайму вокруг всего полиминерального агрегата. Предположительно, это поздняя генерация акантита.

Другой тип изменения халькопирита – замещение его зерен акантитом и ковеллином в виде каймы, представляющей собой срастания названных минералов: пластинки ковеллина занимают разноориентированное положение в акантите. При этом по рядом расположенному зерну галенита также развивается кайма акантита, но без ковеллина (рис. 5).

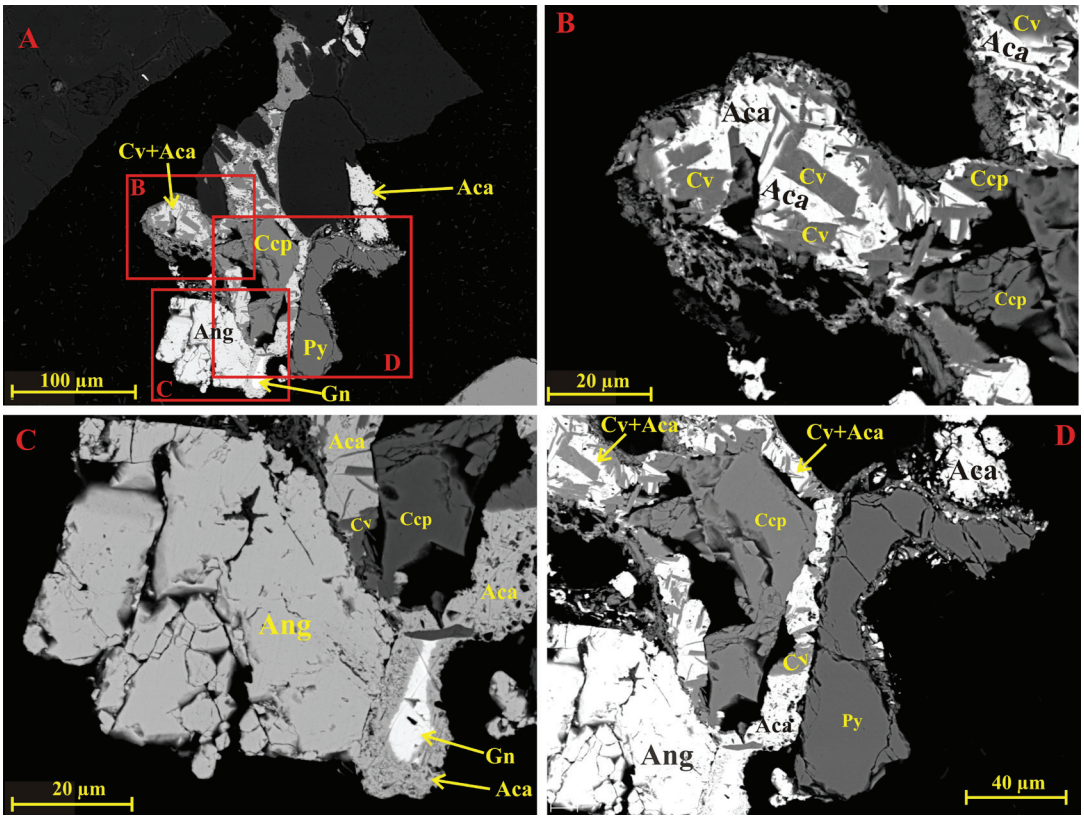

Рис. 5. Развитие акантита и ковеллина по халькопириту. Изображения в обратно-рассеянных электронах: Aca – акантит; Ang – англезит; Ccp – халькопирит; Cv – ковеллин; Gn – галенит; Py – пирит

Fig. 5. Substitution of chalcopyrite with acanthite, hessite, sulfur-rich hessite and «mustard silver». BSE-image and images in characteristic rays of Cu, Te, Ag; Aca – acanthite; Ccp – chalcopyrite; Hes – hessite; Ln – lenaite

Замещающий халькопирит ковеллин тоже обогащен серебром, содержание серебра в нем достигает 3 мас. % (табл. 2).

Как процесс изменения халькопирита можно упомянуть еще его замещение минеральной фазой, обогащенной серой и серебром, существенно обедненной железом по сравнению со стехиометрическим халькопиритом (рис. 6, табл. 2). Сходный процесс изменения широко проявлен на месторождении у пирротина и выражен в замещении его марказитом, но для халькопирита подобное замещения отмечено здесь впервые. Новообразованный сульфид меди и железа имеет тонкую кайму ковеллина (рис. 6).

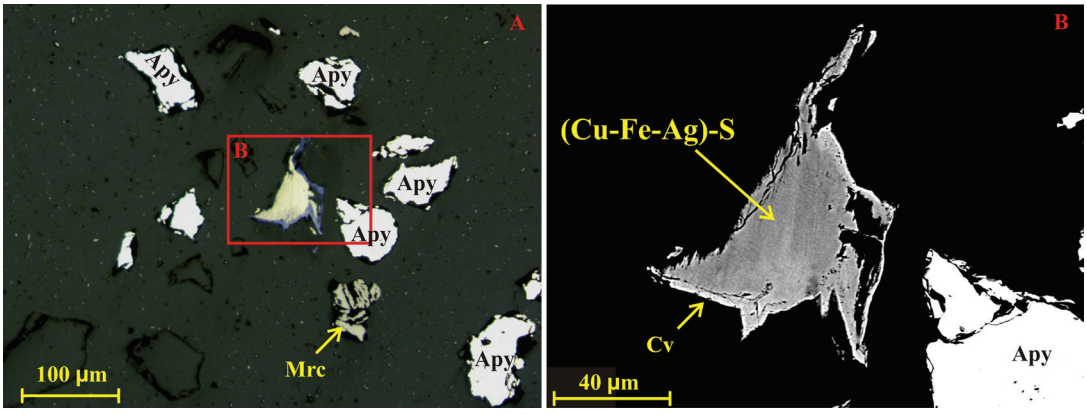

Рис. 6. Измененный халькопирит с каймой ковеллина. Фото аншлифа и изображение в обратно-рассеянных электронах: Apy – арсенопирит; Cv – ковеллин; Mrc – марказит

Fig. 6. Altered chalcopyrite with covellite rim. Epoxy polished section photo and BSE-image: Apy – arsenopyrite; Cv – covellite; Mrc – marcasite

Таблица 2. Химический состав гессита, акантита, ковеллина, халькопиритов и ленаита из кварцевых метасоматитов месторождения Оленинского, мас. %

Table 2. Chemical composition of hessite, acanthite, covellite, chalcopyrite, and lenaite from quartz metasomatite of the Oleninskoe deposit, mas. %

Элемент	Гессит				Акантит				Ковеллин		Халькопирит	Халькопирит измененный	Ленаит
S	н.п.о.	н.п.о.	1.45	2.16	4.79	5.14	13.65	11.61	11.56	13.01	30.84	32.53	33.32	32.78	38.45	35.02	25.56
Fe	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.67	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.36	0.55	0.75	30.01	29.95	16.29	9.86	23.66
Co	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.85	н.п.о.	н.п.о.
Ni	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.51	н.п.о.	н.п.о.
Cu	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	60.49	64.81	34.56	34.16	35.35	45.52	6.47
Br	0.12	н.п.о.	0.11	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Ag	62.93	63.84	65.73	66.75	71.52	70.16	84.32	87.20	88.44	86.63	7.11	0.57	2.11	2.14	8.55	7.62	42.38
Te	36.47	36.93	33.14	31.39	23.43	24.03	2.04	1.20	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	1.51
Pb	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.26	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Сумма	99.52	100.77	100.43	100.30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.00	98.65	100.00	99.04	100.00	98.01	99.57
Коэффициенты формул минералов																	
S			0.15	0.22	0.45	0.48	1.04	0.92	0.92	1.00	0.97	0.99	1.96	1.94	2.23	2.13	1.85
Fe						0.04				0.02	0.01	0.01	1.00	1.01	0.54	0.35	0.98
Co															0.03		
Ni															0.02		
Cu											0.95	0.99	1.00	1.01	1.04	1.39	0.23
Br	0.01		0.00														
Ag	2.01	2.01	2.00	1.99	1.99	1.93	1.92	2.06	2.08	1.98	0.07	0.01	0.04	0.04	0.15	0.14	0.91
Te	0.98	0.99	0.85	0.79	0.55	0.56	0.04	0.02									0.03
Pb					0.01												

Примечание. Коэффициенты формул минералов рассчитаны на два атома для ковеллина, на три атома для гессита и акантита, на 4 атома для халькопирита и ленаита. Н.п.о. – ниже порога обнаружения.

Обсуждение результатов и выводы

Замещение самородного серебра и халькопирита гесситом, акантитом, горчичным серебром, по всей вероятности, проходило в гипогенных условиях. Сам факт формирования минерализации сульфидов и теллуридов при весьмо ограниченном развитии кислородсодержащих фаз говорит об образовании в условиях дефицита кислорода, то есть не в коре выветривания.

Самородное серебро и халькопирит (их отдельные зерна и сростки) в кварцевых метасоматитах замещаются мелкозернистым агрегатом акантита и гессита (в том числе серосодержащего), а интерстиции между зернами сульфидов и теллуридов серебра выполнены кварцем и «горчичным серебром». Следует отметить четкие границы между гесситом и серосодержащим гесситом в этих агрегатах, то есть эти соединения ведут себя как две разные минеральные фазы (рис. 2, 3). Содержание серы в серосодержащем гессите составляет от 4.7 до 15.8 ат. %. Возрастание содержания серы в минерале компенсируется снижением теллура, и сумма S и Te находится в узких пределах 33.26–34.27 ат. %, то есть соответствует формуле $Ag_2(Te,S)$ (табл. 2).

Поскольку признаки замещения гесситов акантитом (и наоборот) не установлены, можно предполагать, что их отложение проходило близкоодновременно.

Впоследствии по рассматриваемым агрегатам развивалась кайма позднего акантита. Каймы акантита отмечены также вокруг зерен галенита, а вокруг халькопирита – каймы, состоящие из акантита и ковеллина. Таким образом, можно выделить две генерации акантита. Поздний акантит отличается от раннего формой выделения и низким содержанием примесей, в нем установлено только железо 0.35 мас. %.

В составе «горчичного серебра» углерод, как было сказано выше, находится в форме углеродистого вещества, а не карбонатов. Это свидетельствует о формировании этого типа «горчичного серебра» в восстановительных условиях и при дефиците кислорода.

Горчичное серебро с хлоридами и бромидами в составе формировалось при участии хлоридных растворов: существенно хлоридный состав анионной части рудообразующих растворов на месторождении был показан нами ранее (Калинин и др., 2021 б).

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004.

Литература

1. Галкин Н. Н. Геология и минералогия золоторуд¬ных проявлений Пеллапахк-Оленинского рудного узла, Кольский полуостров: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук: 25.00.11. Апатиты, 2006. 22 с.
2. Калинин А. А., Волков А. В., Лобанов К. В. Метаморфизованное золото-серебряное месторождение в докембрии Фенноскандинавского щита: новая концептуальная модель // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021а. Т. 496, № 2. С. 132–136. DOI: 10.31857/S2686739721020079.
3. Калинин А. А., Савченко Е. Э., Прокофьев В. Ю. Минералогия и особенности генезиса месторождения золота Оленинского (Кольский полуостров). Апатиты. Изд-во: ФИЦ КНЦ РАН, 2021б. 162 с.
4. Kalinin A. A., Kudryashov N. M. Porphyry-Related Metamorphosed Au-Ag and Cu-Mo Deposits in the Precambrian of the Fennoscandian Shield // Minerals. 2021. V. 11. P. 139. https://doi.org/10.3390/min 11020139.