

ЛИТЕРАТУРА

1. Вилькович Р.В., Пожарицкая Л.К. Элементы-примеси в кальцитах и апатитах из карбонатов Черниговской зоны. — Геохимия, 1982, N 3.
2. Глевасский Е.Б., Кривдик С.Г. Ультраосновные и щелочные породы докембрийского карбонатитового комплекса Приазовья. — Геол. журн, 1977, т. 37, вып. 6.
3. Капустин Ю.Л., Лапицкий Э.М., Погребной В.Т. и др. Карбонатитовая зона Украинского щита. — Сов. геология, 1977, N 9.
4. Крочук В.М. Кристалломорфологические особенности некоторых минералов карбонатитов Приазовья. — Докл. АН УССР. Сер. Б, 1978, N 9.
5. Минералогия Приазовья. Киев: Наук. думка, 1981.
6. Чашка А.И., Марченко Е.Я. О новом редкоземельном ниобате из карбонатитов. — Геол. и геофиз., 1976, N 4.
7. Шафрановский И.И., Мокиевский В.А. Условия роста, геометрия и симметрия скелетных кристаллов. — Зап. Всесоюз. минер. об-ва, 1956, т. 85.
8. Гинзбург А.И., Эпштейн Е.М. Карбонатитовые месторождения. — В кн.: Генезис эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1968.
9. Здорик Т.Б. Эволюция редкоземельной минерализации в карбонатитах на примере одного из месторождений Восточной Сибири. — В кн.: Геология месторождений редких элементов, 1966, N 1.
10. Горжевская С.А., Сидоренко Г.А., Гинзбург А.И. Титано-тантало-ниобаты М.: Недра, 1974.
11. Карбонатиты. М.: Мир, 1969.
12. Пожарицкая Л.К., Эпштейн Е.М. О физико-химических условиях образования карбонатитов. — В кн.: Геохимия, редких элементов в изверженных горных породах. М.: Наука, 1964.
13. Гайдукова В.С. Процессы изменения пирохлора в карбонатитовых месторождениях. — В кн.: Минеральное сырье, 1960, вып. 1.
14. Жабин А.Г., Гайдукова В.С. Взаимоотношения ниобатов — пирохлора, ферсмита и колумбита в щелочных сиенитовых и карбонатитовых комплексах. — Геология рудн. месторождений, 1962, N 1.
15. Hess H.D., Trumpour H.J. A Second Occurrence of Fersmite. — Amer. Miner., 1959, vol. 44, N 1, 2.
16. Sörum H. Contribution to the Mineralogy of the Söve Deposit II, X-ray and Thermal Studies of the Niobium Minerals. — Det Konglige Norske Videnskabers For handlinger, Bd. 28, 1955, nr. 23.
17. Veen A.H., Van der. The Alteration of Pyrochlore to Fersmite in the Mbeya Carbonatite. — Geol. en mijnbouw, 1960, vol. 39, N 10.
18. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов. — Геология рудн. месторождений, 1967, N 5, т. 9.
19. Горжевская С.А., Сидоренко Г.А. Особенности минералов структурного типа эшинита. — В кн.: Минеральное сырье, 1963, вып. 8.
20. Horne H.D., Butler J.R. A Second Occurrence of Lindochite. — Miner. Mag., 1965, v. 34.
21. Комков А.И. Рентгенометрическое исследование эшинитов. — Минералогический сборник/Труды Всес. н.-и. Геол. ин-та. Нов. сер., 1963, т. 96.

УДК 549.282

М.С. САХАРОВА, И.А. БРЫЗГАЛОВ, А.В. ЕФИМОВ

МИНЕРАЛОГИЯ СЕРЕБРА ГАЛЕНИТ-СФАЛЕРИТОВЫХ ЖИЛ ОХОТСКО-ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА

В западной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса развиты серебряносные галенит-сфалеритовые рудные тела, содержащие большую группу минералов серебра. Особенности минерального состава позволяют рассматривать эти рудопроявления как новый тип серебряного оруденения в вулканогенном поясе.

Серебряносные рудные тела расположены в пределах крупного грабена, ответвляющегося от пояса в субмеридиональном направлении и наложенного на мезозойды Яно-Колымской складчатой области. Грабен заполнен вулканогенно-осадочной толщей мелового возраста, прорванной интрузивными и субвулканическими образованиями преимущественно кислого состава. В пределах грабена развиты вулканотектонические структуры: купола и депрессии, как правило, размещенные на пересечении региональных разломов. Оруденение обычно приурочено к вулканотектоническим структурам.

Рудные тела локализованы в кислых эффузивах верхнемелового возраста или в зоне контакта эффузивов с подстилающей терригенно-осадочной толщей нижнего мела и контролируются крутопадающими субмеридиональными разрывными нарушениями или пологими трещинами отслоения северо-восточного про-

Таблица 1

Минеральный состав сереброносных галенит-сфалеритовых жил
Охотско-Чукотского вулканогенного пояса

Минерал	Широко распространенные	Средней распространенности	Редкие
Занние	Кварц, сфалерит, галенит	Хлорит, арсенопирит, халькопирит, пирит, марказит, буланжерит, пирротин, гудмундит станнин	Карбонаты, валерит, Sb—люцит- фаматинит(?)
Минералы серебра	Фрейбергит, пираргирит, стефанит	Диафорит, миаргирит, акантит	Полибазит, самородное серебро, алларгентум
Гипергенные минералы		Гидроокислы железа, халькозин, ковеллин	Акантит, самородное серебро

стирания, образовавшимися на границе двух разнородных в физико-механическом отношении толщ. Рудные тела представляют собой минерализованные зоны дробления, в которых кулисообразно расположены стержневые кварц-сульфидные жилы мощностью до одного метра. Выделяются полосчатые метасоматические тела и асимметричные жилы выполнения с брекчиевидными, прожилковыми, коррозионными и массивными текстурами.

Сульфидная минерализация в рудных телах распределена неравномерно, образует струи, линзы и гнезда; количество сульфидов составляет в среднем до 20—30%, уменьшаясь в пережимах и увеличиваясь в раздувах рудных тел. Гидротермальные жилы сопровождаются ореолом интенсивно окварцованных, аргиллизированных, серицитизированных и хлоритизированных вмещающих пород. Среди рудных минералов преобладают сфалерит и галенит. Подчиненную роль играют арсенопирит, халькопирит, пирит, марказит, пирротин, буланжерит и станнин. Жильные минералы представлены кварцем, хлоритом и карбонатом. Среди серебряных минералов широко распространены фрейбергит, пираргирит и стефанит (табл. 1). Важнейшие минералы представлены несколькими генерациями, связанными со стадийностью процесса минералообразования, который подразделяется на три стадии, включающих по несколько парагенетических минеральных ассоциаций. Наиболее ранней из них является *кварц-хлорит-сульфидная стадия*, представленная следующими парагенетическими ассоциациями: кварц-пирит-арсенопиритовой с незначительным количеством пирротина; кварц-хлорит-сфалеритовой с подчиненным количеством халькопирита; пирротин-арсенопиритовой с гудмундитом.

В течение следующей — ранней сереброносной *халькопирит-галенит-сфалеритовой* стадии происходила последовательная кристаллизация халькопирита, сфалерита, галенита с подчиненными количествами буланжерита, фрейбергита и пираргирита.

Среди минералов, относящихся к ранним стадиям минерализации, наибольший интерес представляют сереброносный галенит и сфалерит, являющиеся главными минералами рудных тел, а также гудмундит, способствующий оценке физико-химических условий минералоотложения. Минералы, образовавшиеся во вторую стадию, формируют пирротин-халькопиритовый, станнин-сфалеритовый и буланжерит-галенит-сфалеритовый парагенезисы. Сфалерит и галенит представлены

обычно несколькими генерациями, из которых наиболее широко распространена первая, отличающаяся высокой сереброносностью.

Процесс минералообразования завершается стадией *сульфосолей серебра*, характеризующейся последовательной кристаллизацией минералов серебра, главными из которых являются серебряно-сурьмяные сульфосоли, фрейбергит, пираргирит и стефанит. Наряду с ними встречены более редкие: миаргирит, диафорит, минералы группы полибазита и алларгентум (табл. 1). Акантит и самородное серебро являются более поздними по времени кристаллизации относительно Ag-Sb сульфосолей и встречены в незначительных количествах. По времени отложения минералы серебра сближены между собой.

ВАЖНЕЙШИЕ СУЛЬФИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Ниже приводится характеристика важнейших рудных минералов.

Галенит относится к широко распространенным рудным минералам. Важнейшей особенностью галенита является высокая сереброносность, связанная главным образом с первой генерацией минерала. Галенит второй генерации, образующий структуры распада твердого раствора с диафоритом, и, в особенности, галенит третьей генерации, образующийся при замещении диафорита пираргиритом, пользуются весьма ограниченной распространенностью. Пространственно галенит ассоциирует со сфалеритом, цементируя его раздробленные агрегаты.

Содержание серебра в галенитах варьирует в широких пределах — от 1400 до 6800 г/т (в одном образце — свыше 10 кг/т), составляя в среднем 3660 г/т (табл. 2). Детальное изучение образцов высокосеребристого галенита под микроскопом показало, что они постоянно содержат округлые или удлинённые выделения минералов серебра размером 3—6 мкм, среди которых обычно преобладают фрейбергит и пираргирит. К аналогичному выводу можно прийти, проанализировав соотношение серебра и сурьмы в тех же образцах галенита.

Параметр элементарной ячейки высокосеребристых галенитов (14 определений) оказался одинаковым у всех образцов и равным параметру спектрально чистого синтезированного сульфида свинца [9]. Все изложенное позволяет сделать заключение о преимущественно минеральной форме примеси серебра в галените, что находится в соответствии с результатами многих исследований.

Сфалерит является наиболее распространенным в жилах рудным минералом. Он представлен четырьмя генерациями, из которых преобладает сфалерит-1. Сфалерит-1 развит в виде скоплений тетраэдрических кристаллов буровато-черного

Таблица 2

Содержание элементов-примесей (мас. %) в галенитах и сфалеритах (по данным количественного спектрального анализа)

Содержание	Ag	Sb	As	Bi	Fe
Галениты					
Минимальное	0,10	0,16	Не обн.	Не обн.	0,33
Максимальное	0,68	0,86	0,95	0,080	1,35
Среднее из 11 определений	0,37	0,51	0,35	0,012	0,56
Сфалериты					
Минимальное	0,002			0,0004	1,24
Максимальное	0,1			0,020	12,0
Среднее из 7 определений				0,006	9,16
Чувствительность определений	0,0005	0,01	0,01	0,0005	0,1
Анализы выполнены на квантометре ДФС-36 (ИМГРЭ), аналитик З.А. Байкова.					

цвета, раздробленных и сцементированных арсенопиритом-2. Сфалерит-2 кристаллизовался после халькопирита-2, о чем свидетельствует наличие его кайм вокруг халькопирита и цементация раздробленных агрегатов последнего. Сфалерит-3 выделился после галенита-1, он заполняет в нем микротрещины, либо обрастает зерна галенита. С помощью структурного травления установлено полисинтетическое двойникование, также и зональное строение зерен сфалерита-3. Сфалерит-4 встречен в скоплениях сульфосолей серебра и морфологически отличается от ранних генераций. Он образует одиночные сростки радиально-лучистого строения в пираргирите. Ядро сферолитов обычно сложено бурым сфалеритом, а внешние зоны роста — медово-желтым клейофаном.

По данным количественного спектрального анализа основными элементами-примесями в сфалерите является железо, марганец и кадмий. Содержание серебра изменяется от 20 до 1000 г/т (табл. 2). Поскольку значительные количества железа в сфалерите связаны с минеральными формами вхождения (халькопирит, пирротин, валерит), содержание изоморфного железа было определено по параметру элементарной ячейки после введения поправок на содержание кадмия и марганца по уравнению регрессии Н. П. Юшкина и А. Б. Макеева [8]. Параметр a_0 сфалерита-1 колеблется от 5,416 до 5,419 Å, что свидетельствует о незначительных вариациях железистости минерала (в пределах 1—2 мас. %) и сопоставимо с результатами, вычисленными по уравнению регрессии.

В изученных образцах установлены также прямые корреляционные связи между концентрациями Co — Mn, Ge — In, Sn — Ga.

Халькопирит является постоянным компонентом руд, хотя в количественном отношении заметно уступает галениту и сфалериту. Выделяется 4 генерации халькопирита, из которых первая и третья представляют собой эмульсионную вкрапленность в сфалерите, а четвертая образуется при замещении фрейбергита пираргиритом и является мало распространенной. Наибольшее количество халькопирита представлено второй генерацией, которая образовалась после вторых генераций пирротина и арсенопирита, поскольку халькопирит цементирует раздробленные агрегаты последнего и содержит реликты пирротина в виде включений. В свою очередь, зерна халькопирита-2 обрастают сфалеритом второй генерации, о чем упоминалось выше.

Выделения халькопирита-2 представляют собой тонкозернистый агрегат пластинчато-сдвойникованных зерен, местами со следами дробления. Иногда в халькопирите наблюдаются "звездочки" сфалерита.

Гудмундит впервые обнаружен в сереброносных галенит-сфалеритовых жилах. Этот сравнительно редкий минерал образует небольшие гнездовые скопления

Sn	Ga	Co	Mn	Ge	In	Cd
Галениты						
0,065			0,017	0,0004		0,015
0,21	He обн.	He обн.	0,035	0,0013	He обн.	0,050
0,103			0,026	0,0008		0,032
Сфалериты						
0,0014	0,0004	0,0016	0,13	0,003	He обн.	0,3
0,038	0,0035	0,011	0,22	0,0097	0,16	0,5
0,0183	0,0018	0,0059	0,16	0,0065	0,0661	0,4
0,001	0,0003	0,0003	0,005	0,0003	0,0003	0,005

Таблица 3

Параметры элементарной ячейки гудмундита из серебросфалерит-галенитовых жил
Охотско-Чукотского вулканогенного пояса

Параметры элементарной ячейки, Å	AS TMN8-104
a_0 10,28±0,07	10,04
b_0 5,89±0,02	5,95
c_0 6,77±0,01	6,74
90°47±00°52'	90°

короткопризматических кристаллов, морфологических сходны с кристаллами арсенипирита. Размеры их обычно колеблются в пределах десятых долей миллиметра. При структурном травлении у зерен гудмундита выявляется тонкая ритмичная зональность. Кристаллы гудмундита нередко раздроблены, обломки сцементированы и частично корродируются более поздними по времени выделения галенитом и сульфосолями серебра. Верхняя возрастная граница минерала остается неопределенной.

Минерал диагностирован под микроскопом по характерным оптическим свойствам и особенностям морфологии зерен. С помощью лазерного микроспектрального анализа в его составе, помимо основных компонентов, установлена примесь висмута и кобальта.

Диагностика минерала подтверждена рентгеноструктурно. Межплоскостные расстояния гудмундита и параметры его элементарной ячейки (табл. 3) оказались близки к приводимым в справочной литературе [9]. Основные линии на рентгенограмме: 4.04(20), 2.98(23), 2.79(40), 2.67(26), 2.61(20), 2.54(100), 1.704(25), 1.612(23).

Минеральные ассоциации с гудмундитом более характерны для золото-сурьмяных месторождений, где они образуются при повышенном химическом потенциале железа, в восстановительной обстановке и низкотемпературных условиях [5]. С учетом этого можно предположить, что в данном случае гудмундит образовался в конце кварц-хлорит-сульфидной стадии, одновременно или несколько позже пирротин-арсенипиритовой парагенетической ассоциации.

МИНЕРАЛЫ СЕРЕБРА

Минералы серебра описаны в последовательности их образования.

Фрейбергит является основным серебряным минералом изученных руд, он представлен тремя генерациями, отличающимися содержанием серебра и парагенезисами.

Фрейбергит-1 образует хаотично расположенные округлые или удлиненные включения в галените размером до 10 мкм. Фрейбергит-2 наблюдается в галените в виде прямолинейных вростков, кристаллизуясь по системе трещин кубической спайности минерала-матрицы. В сфалерите фрейбергит-2 выполняет извилистые волосовидные трещины, беспорядочно пересекающие агрегаты зерен минерала. Фрейбергит-3 образует в блеклой руде второй разновидности систему извилистых волосовидных прожилков мощностью 4—6 мкм, которые под микроскопом отличаются от минерала—матрицы голубоватой окраской, повышенной хрупкостью при полировке и склонностью к выкрашиванию.

Количественные соотношения между фрейбергитом второй и третьей генерации сильно варьируют: от появления единичных микропрожилков фрейбергита-3 до практически полного замещения им минерала второй генерации. В последнем случае сохраняются мелкие реликтовые выделения фрейбергита-2. Вторая и третья

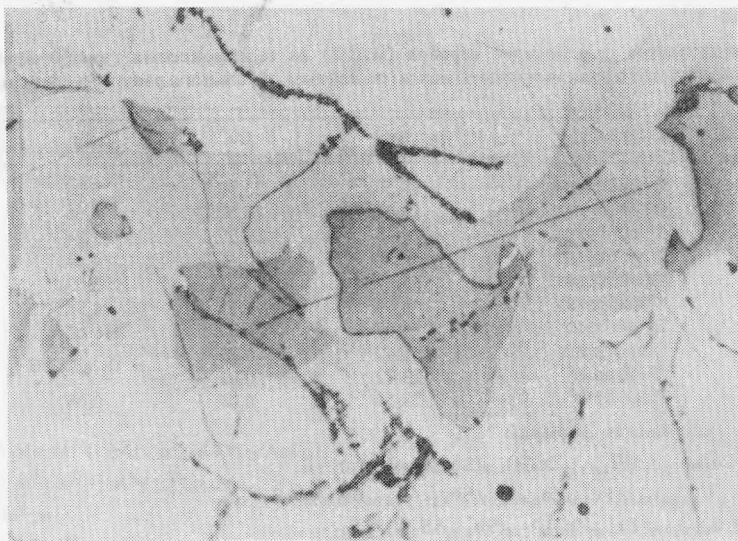


Рис. 1. Гетерогенный фрейбергит в сростании с диафоритом (белое). Полир. шлиф, без анализатора, масляная иммерсия, увел. 380

генерации фрейбергита избирательно подвергаются светотравлению вследствие особенностей химического состава. Закономерностей в распределении выявленных генераций минерала в пределах изучавшихся интервалов рудных жил не установлено. В одной из рудных жил встречен фрейбергит, обнаруживающий гетерогенное строение, заключающееся в сростании двух разновидностей минерала: светлой и темной. Светлая разность наблюдается в виде реакционной каймы на контакте темной с диафоритом (рис. 1). Отличия в окраске минерала обусловлены повышением содержания серебра и уменьшением меди в светлой разновидности по сравнению с темной.

Важнейшей особенностью химического состава фрейбергита изученных рудных жил являются высокие содержания серебра, варьирующие от 18,5 до 46,0 мас.% (табл. 4). По степени серебристости выделяются две группы образцов — с содержанием Ag 18,5—19,5 мас.%, что соответствует трем формульным единицам, и группа высокосеребристых образцов (26,45 — 46,04 мас.% Ag), характеризующихся высокой степенью замещения меди серебром. Особого интереса заслуживают данные о фрейбергите, содержащем 46,04 мас.% Ag (или 9 формульных единиц). Подобные содержания в образцах из месторождений СССР ранее не отмечались и известны лишь в единичных находках за рубежом.

Среди других особенностей химического состава фрейбергитов отметим, что изученные образцы представлены практически чисто сурьмяными разновидностями, в которых железо резко преобладает над цинком (табл.4).

Сопоставляя полученные результаты с литературными данными [2, 11 и др.], можно констатировать, что гетерогенное строение у высокосеребристых фрейбергитов наблюдается во многих случаях. Гетерогенность может быть обусловлена не только направленным изменением состава минерала в процессе его кристаллизации или диффузионным перераспределением в твердофазовом состоянии химических элементов [3], но и неравновесными условиями кристаллизации, а также более сложными, чем предполагаются в настоящее время, схемами изоморфизма в фрейбергитах.

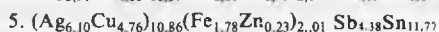
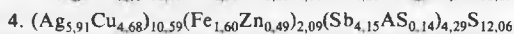
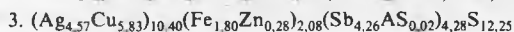
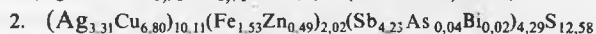
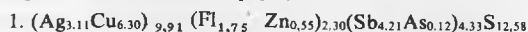
Диафорит развит локально только в одной из жил, где образует небольшие гнездовидные скопления размером до 3—4 мм. Минерал встречен в тесных сроста-

Таблица 4

Химический состав сульфосолей серебра (мас.%) из сереброносных галенит-сфалеритовых жил Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (по данным локального рентгено-спектрального анализа)

N	Минерал	Ag	Cu	Fe	Zn
1	Фрейбергит	18,50	23,83	5,38	1,99
2	Фрейбергит	19,41	23,50	4,66	1,76
3	Фрейбергит	26,45	19,27	5,24	1,15
4	Фрейбергит	32,50	15,16	4,54	1,62
5	Фрейбергит	33,37	15,32	5,03	0,77
6	Фрейбергит	46,04	4,35	4,94	0,71
7	Полибазит	76,67	4,32	Не обн.	0,02
8	Миаргирит	36,47	0,02	"	Не обн.
9	Диафорит	23,72	0,01	"	"
10	Диафорит	28,54	0,07	0,05	"

Кристаллохимические формулы:



Анализы: 1—4,6,10 выполнены А.И. Цепиным (ИГЕМ АН СССР); 5,7—9 В.И. Сапиным (ДВГИ).

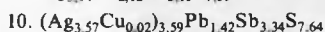
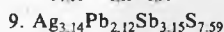
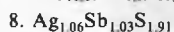
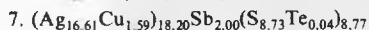
ниях с фрейбергитом, миаргиритом и пираргиритом, к которым он близок по времени кристаллизации.

Обычно диафорит образует аллотриоморфнозернистые агрегаты, индивиды как правило полисинтетически сдвойникованы и содержат микровключения галенита, форма которых изменяется в зависимости от ориентировки сечения от пластинчатой (продольное сечение) до червеобразной, изогнутой — поперечное сечение зерна диафорита (рис. 2,а). Неизменность ориентировки вростков и приблизительно постоянное количественное соотношение между этими минералами позволяют рассматривать их как продукт распада твердого раствора или следствие фазового разложения минерала, оказавшегося нестабильным в изменившихся физико-химических условиях. В системе $Ag_2S—PbS—Sb_2S_3$ (рис. 3) такой фазой является, по всей видимости, фрей-слебенит ($AgPbSbS_3$), поскольку при его разложении на диафорит и галенит должна образовываться смесь, состоящая по объему на 88% из диафорита и на 12% из галенита, что достаточно близко к наблюдаемым на рис. 2,а соотношениям. В ряде случаев наблюдалась перекристаллизация диафорита. Вдоль микротрещин образуются полисинтетически сдвойникованные зерна меньшего размера округлой изометричной формы, лишенные включений галенита. Вероятно в этом случае процесс перекристаллизации сопровождался частичным выносом свинца. Не исключено, что "перекристаллизованный диафорит" представляет собой вторую генерацию минерала.

Химический состав минерала близок к теоретическому и удовлетворительно пересчитывается на кристаллохимическую формулу $Ag_3Pb_2Sb_3S_8$. Отклонения от стехиометрии обусловлены по всей вероятности погрешностями анализа. Диафорит изучен рентгенометрически. Главные линии минерала на рентгенограмме: 3,28(10); 2,81(10); 2,03(5); 1,704(5); 1,648(5); 1,471(5). Параметры элементарной ячейки диафорита оказались равными: $a_0 = 15,58$; $b_0 = 32,79$; $c_0 = 5,96$ и близки к справочным данным [9].

Миаргирит пространственно тяготеет к диафориту, часто образует с ним тесные сростания типа мирмекитов (рис. 4,а). Взаимоотношения между этими мине-

Pb	Bi	Sb	As	S	Te	Сумма
He обн.	He опр.	28,27	He обн.	22,22	He опр.	100,19
"	He обн.	27,99	0,16	21,92	"	99,66
"	He опр.	27,29	0,08	20,89	"	100,37
"	He обн.	25,78	0,52	19,71	"	99,82
0,20	"	27,02	Сл.	19,13	He обн.	100,84
He обн.	"	24,98	0,15	18,90	"	100,08
Сл.	"	10,44	Сл.	11,99	0,23	103,67
0,09	0,05	39,92	0,01	19,50	0,01	96,07
30,61	He обн.	26,88	0,01	16,83	Сл.	98,38
21,90	"	30,20	He обн.	18,16	He опр.	98,92



алами свидетельствуют о возможности частичном замещении диафорита миаргиритом.

Химический состав минерала по данным локального рентгеноспектрального анализа (табл. 4) близок к теоретическому. Из элементов-примесей в нем установлены Cu, Pb, Bi, As, Te. Межплоскостные расстояния миаргирита удовлетворительно согласуются со справочными данными [9]. Главные линии на рентгенограмме: 3,40(10); 2,89(10); 2,75(8); 2,01(5); 1,965(5); 1,804(6).

Пираргирит в описываемых гидротермальных жилах является одним из главных минералов серебра. Он образует примазки, тончайшие прожилки и гнезда размером до нескольких сантиметров в поперечнике, локализованные как в самих рудных жилах, так и в измененных вмещающих породах. На основании минералогических исследований выделено две генерации минерала.

Пираргирит-1 совместно с фрейбергитом-1 образует отмеченные выше микровключения округлой или удлиненной формы в серебросодержащем галените, являясь одним из основных минералов-носителей серебра в сульфиде свинца.

Пираргирит-2 количественно преобладает над ранней генерацией минерала и вследствие широкой распространенности ассоциирует со многими рудными минералами. Микропрожилки пираргирита-2 пересекают мелкокристаллические агрегаты сфалерита и галенита. Нередко метакристаллы пираргирита-2 содержат многочисленные округлые включения галенита, являющиеся реликтами, сохранившимися в процессе его замещения (рис. 4,б). Подобные соотношения установлены также между фрейбергитом-2 и пираргиритом-2, причем избыток железа и меди, образующийся в процессе замещения, частично фиксируется в виде тончайшей вкрапленности халькопирита-2 в пираргирите. При замещении диафорита пираргиритом-2 вдоль микротрещин свинец частично фиксируется в виде мелких зерен галенита-3 (см. рис. 2,б).

Минерал диагностирован по характерным оптическим свойствам и рентгенометрически. Качественный анализ на рентгеноспектральном микроанализаторе

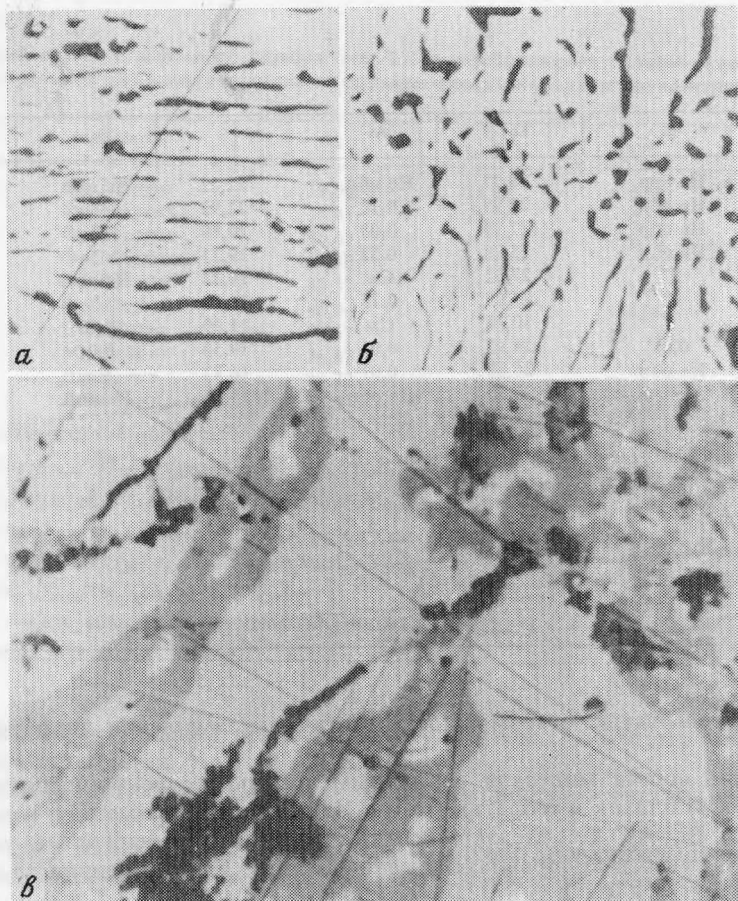


Рис. 2. Соотношение между галенитом (черное) и диафоритом (белое) — (а), диафоритом (светло-серое) и пираргиритом (темно-серое) — (б). Полир. шлиф, без анализатора, масляная иммерсия. а — протравлено, увел. 220, б — увел. 350

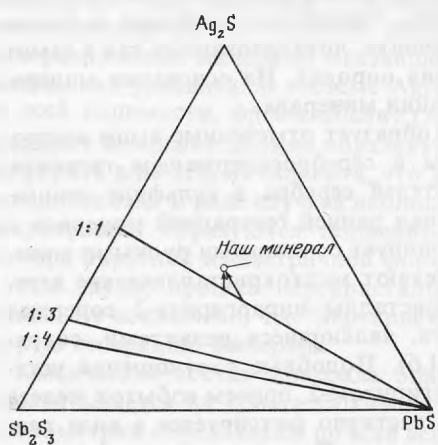


Рис. 3. Фазовый состав системы $\text{Ag}_2\text{S}-\text{PbS}-\text{Sb}_2\text{S}_3$ (по литературным данным)

подтвердил наличие в минерале серебра, сурьмы, серы и небольших количеств мышьяка.

Межплоскостные расстояния и параметры гексагональной элементарной ячейки минерала ($a_0 = 11,05$, $c_0 = 8,72\text{\AA}$) близки к справочным данным [9], что также свидетельствует о незначительном количестве изоморфных примесей меди и мышьяка в его составе.

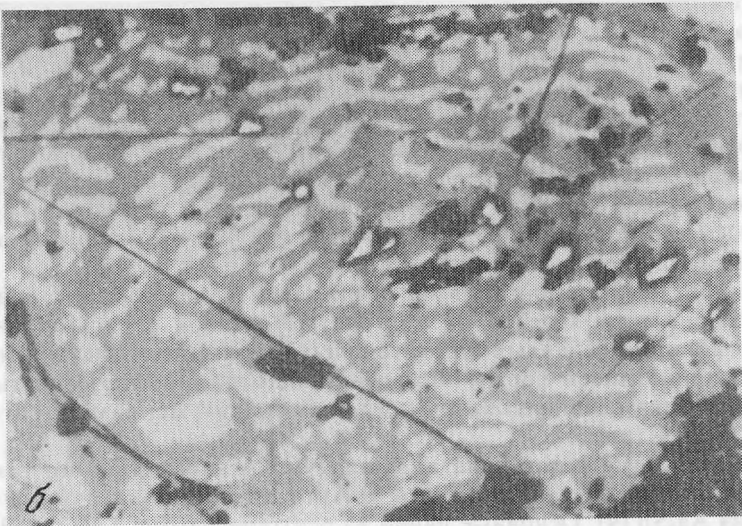
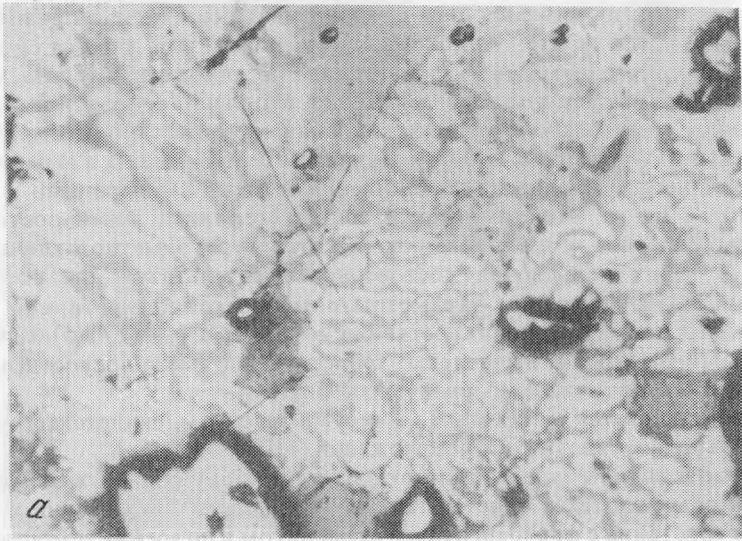


Рис. 4. Мирмекитовые сростания

а — миаргирита (светлое) и диафорита (темное); *б* — галенита (белое) и пираргирита (светло-серое). Полированный шлиф, масляная иммерсия. *а* — николи скрещены, увел. 300, *б* — без анализатора, увел. 300

Стефанит относится к распространенным минералам серебра изученных рудных жил, хотя и не образует крупных скоплений. Наиболее тесно он ассоциирует с пираргиритом, совместно с которым образует тончайшие примазки, прожилки и небольшие гнездообразные скопления в минералах ранних ассоциаций. Иногда стефанит наблюдается в виде полисинтетически sdвойникованных кристаллов призматического габитуса длиной до 5 мм, образованных комбинацией гексагональной призмы с несколькими пирамидами и пинакоидом (001). Кристаллы стефанита уплощенного габитуса описаны в литературе [1] на одном из рудопроявлений Арманской вулканоструктуры.

Минерал представлен в рудах одной генерацией. Подобно пираргириту-2,

он образует пластинчатые вроски в галените и волосовидные прожилки прихотливой формы в сфалерите. Аллотриоморфно-зернистый агрегат зерен стефанита нарастает на мелкие щетки тетраэдрических кристаллов фрейбергита, минерал также выполняет микротрещины, пересекающие скопления пираргирита. В одной из изучавшихся жил гнездообразные скопления стефанита, пираргирита и фрейбергита в результате перекристаллизации часто преобразованы в агрегат полигональных зерен с неопределенными соотношениями между минералами.

Несмотря на то, что химический состав стефанита почти постоянен, рентгенограммы минерала, опубликованные в литературе, заметно отличаются одна от другой. В целях повышения достоверности результатов для всех измеренных отражений были вычислены параметры ромбической элементарной ячейки минерала, которые после усреднения составили: $a_0 = 7,72(3)$, $b_0 = 12,43(5)$, $c_0 = 8,53(6)$ Å. По этим величинам были вычислены теоретические межплоскостные расстояния, оказавшиеся достаточно близкими к измеренным.

Стефанит является минералом — геотермометром, свидетельствующим о низкотемпературных условиях рудоотложения [4].

Минералы группы полибазита относятся к числу редких в описываемом типе жил. Они встречаются в виде мелких полигональных включений в пираргирите, образуют сростания с фрейбергитом и стефанитом и по всей видимости близки к ним по времени выделения. По оптическим свойствам предварительно было выделено три минерала этой группы, установленные различия между ними подтверждены на рентгеновском микроанализаторе JXA-5A. Содержание серебра в двух из них составили соответственно 76,67 мас. % и 72,65 мас. %. Химический анализ первого минерала приведен в табл. 4. Все эти минералы не содержат в пределах точности измерений мышьяка и могут лишь предварительно отнесены к полибазитам. В силу сложности и недостаточности изученности минералов группы полибазита их систематика до настоящего времени остается недостаточно разработанной.

Алларгентум распространен локально в одной из жил. По времени образования он сопоставим с самородным серебром, но выделялся несколько раньше, поскольку последнее образует оторочки по периферии выделений алларгентума. Совместно с самородным серебром и акантитом алларгентум образует пленки и заполняет интерстиции между кристаллами кварца.

В полированных сечениях для минерала характерно высокое отражение, в отличие от самородного серебра — желтоватый оттенок и сильная анизотропия с цветным эффектом в блеклых буровато-синих тонах. Пластинчатые и изометричные скопления прихотливой формы образованы аллотриоморфнозернистым агрегатом полисинтетически сдвойникованных зерен алларгентума, размер которых не превышает 140 мкм (рис. 5).

Межплоскостные расстояния алларгентума и параметры его гексагональной элементарной ячейки ($a_0 = 2,95$, $c_0 = 4,79$ Å) тождественны таковым синтетического соединения Ag_6Sb [9]. Основные линии на рентгенограмме: 2,55(3), 2,38(3), 2,24(10), 1,467(4), 1,233(3).

Акантит встречается в рудах в незначительных количествах и представлен как первичными, так и гипергенными образованиями. Пространственно гипогенный акантит связан с пираргиритом, стефанитом и самородным серебром, он образует в них волосовидные микропрожилки прихотливой формы мощностью 3—6 мкм, хаотично пересекающие границы зерен минералов. В тесном сростании с самородным серебром акантит кристаллизуется в мелких полостях внутри кристаллов пираргирита. Единичные выделения акантита в виде агрегатов округлой изометричной формы нарастают на грани кристаллов пираргирита и стефанита, местами слабо их корродируя (рис. 6).

Акантит диагностирован по оптическим свойствам, подтвержден рентгенометрически. Основные линии на рентгенограмме: 3,09(30); 2,67(37); 2,61(80); 2,59(70); 2,45(90); 2,43(82); 2,39(100); 2,22(30).

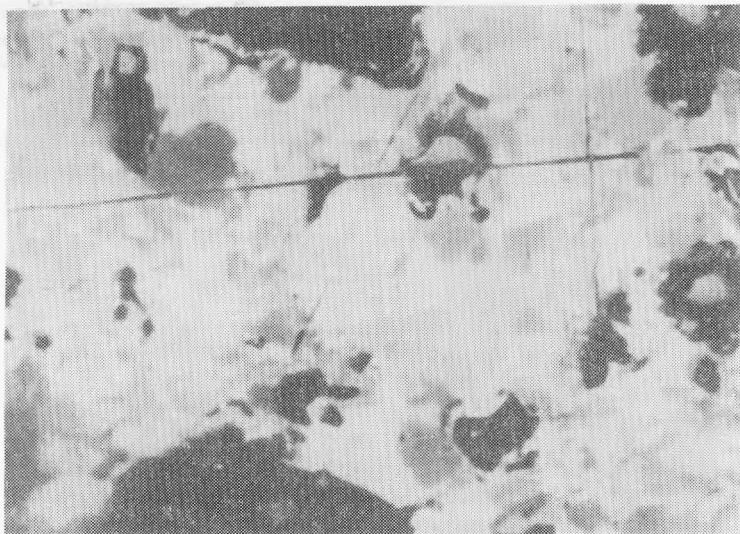


Рис. 5. Тонкозернистый агрегат зерен алларгентума. Полир. шлиф, протравлено, николи неполностью скрещены, масляная иммерсия, увел. 500

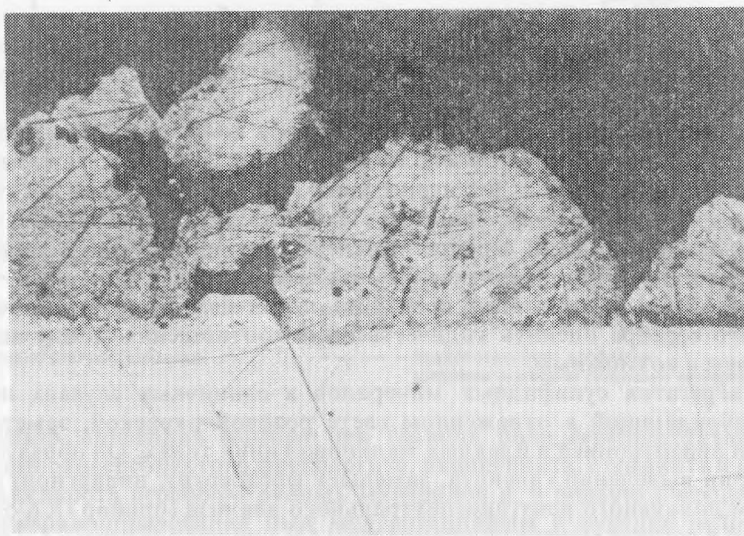


Рис. 6. Нарастание акантита (темно-серое) на грань кристалла стефанита (светло-серое). Полир. шлиф, николи неполностью скрещены, масляная иммерсия, увел. 250

Гипергенный акантит образует среди гидроокислов железа комковатые скопления неправильной формы, тончайшие пленки и субмикроскопические каплевидные выделения. Гипогенные рудные минералы в подобных агрегатах отсутствуют.

Самородное серебро распространено в жилах локально и встречается обычно в первичных рудах в сростании с пираргиритом, стефанитом, алларгентумом и акантитом. Серебро образует единичные округлые микровключения во фрейбергите, пираргирите и стефаните, наблюдается в виде оторочек по периферии зерен стефанита или микропрожилков, пересекающих его в произвольных направлениях. Взаимоотношения самородного серебра и акантита свидетельствуют о близости времени их кристаллизации, поскольку местами серебро каймами обростает выделения акантита, либо акантит частично замещает обособления

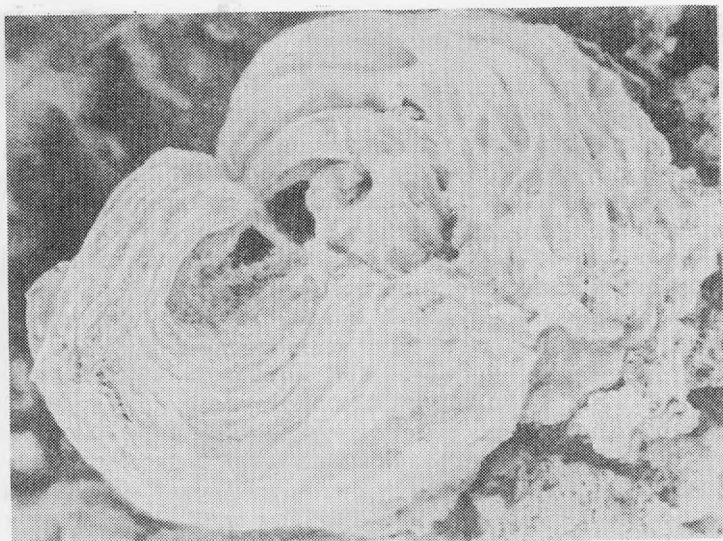


Рис. 7. Скрученный агрегат нитевидных кристаллов самородного серебра. Сканирующий микроскоп, увел. 25

самородного серебра. В единичных случаях в небольших полостях встречены агрегаты нитевидных спиральноизогнутых кристаллов самородного серебра (рис. 7). Структурным травлением в серебре выявлена однороднозернистая субструктура без признаков зональности.

Гипергенное самородное серебро встречается во вторичном акантите в виде каплевидных и гнездовидных обособлений. Такие же его выделения наблюдаются среди гидроокислов железа. В гипергенном серебре, в отличие от гипогенного, микровключения серебряных минералов отсутствуют. Структурным травлением в гипергенном самородном серебре выявлена однороднозернистая субструктура, подобная наблюдаемой в первичном самородном серебре.

Ввиду сходства морфологии и свойств первичных и вторичных акантита и самородного серебра оценить количественные соотношения между ними пока не представляется возможным.

Среди агрегатов сульфидных минералов в единичных случаях наблюдается минерал, обладающий в отраженном свете розовой окраской, заметным двуотражением и анизотропией в блеклых малиново-синих тонах. Он образует оторочки по периферии выделений галенита, замещает фрейбергит, пираргирит и стефанит. По данным локального рентгеноспектрального анализа (прибор JXA-5A, оператор В.И. Сапин) в составе минерала установлены следующие элементы: Cu 40,88 мас. %, Sb 26,82 мас. %; S 25,71 мас. %. Анализ пересчитывается на кристаллохимическую формулу Cu_3SbS_4 , что позволяет считать данный минерал Sb-люцитом или фаматинитом.

СТАДИЙНОСТЬ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

По геологической позиции и минералого-геохимическим особенностям серебряносные галенит-сфалеритовые жилы представляют собой, самостоятельный (в пределах вулканогенного пояса) тип серебряного оруденения, характеризующегося широким набором элементов, среди которых важнейшая роль принадлежит Ag, Pb, Zn, Fe, Cu, Sb. В ряде случаев присутствует Sn. Руды имеют кварц-сульфидный состав, отличаются доминирующей ролью сфалерита и галенита и содержат

Таблица 5

Схема последовательности минералообразования сереброносных галенит-сфалеритовых жил

Минералы	Стадии		
	кварц-хлорит-сульфидная	халькопирит-галенит-сфалеритовая	сульфосолей серебра
Кварц	1 2		3
Пирит	1		3 ?
Арсенопирит	1		
Пирротин	1	?	
Хлорит			
Сфалерит	1	2	3 4
Халькопирит	1	2	3 4
Гудмундит		?	
Станнин			
Галенит			1 2 3
Буланжерит			
Фрейбергит			1 2+3
Пираргирит			1 2
Карбонат			
Диафорит			
Миаргирит			
Стефанит			
Полибазит			
Алларгентум			
Акантит			
Серебро самор.			

■ — широко распространенные

■ — ограниченно распространенные

— — локально распространенные

— — внутростадийное дробление, цифрами показаны генерации минералов

сложный набор минералов серебра при главной роли серебро-сурьмяных сульфосолей — высокосеребристого фрейбергита, пираргирита, стефанита и др. Типична общая зараженность серебром рудных минералов и, в первую очередь, галенита. Процесс минералообразования был многостадийным и нередко осложнялся периодами внутростадийного дробления, сопровождающегося появлением генераций ряда минералов. Подавляющее большинство рудных минералов кристаллизовалось из истинных растворов при подчиненной роли явлений метасоматоза и перекристаллизации в твердом состоянии. В процессе формирования жил выделены три стадии минерализации (табл. 5):

1) кварц-хлорит-сульфидная; 2) халькопирит-галенит-сфалеритовая; 3) стадия сульфосолей серебра.

Кварц-хлорит-сульфидная стадия началась с отложения кварца первой генерации, цементирующего обломки гидротермально измененных вмещающих пород. Жилы молочно-белого кварца с убогой вкрапленностью пирита, арсенопирита и пирротина были брекчированы и сцементированы полупрозрачным кварцем-2 с гнездами хлорита и ассоциирующим с ним сфалеритом-1. Позднее сфалерита-1 выделялись железосодержащие сульфиды — пирротин, арсенопирит, пирит. Предположительно в конце стадии отлагался гудмундит. О температурных условиях

первой стадии минералообразования можно судить по данным гомогенизации газовой-жидких первичных включений в кварце-1 и -2, которые соответственно составляют 300—290°С (кварц-1) и 280—260°С (кварц-2). Этим данным не противоречит появление гудмундита, верхний температурный предел устойчивости которого составляет 260—280°С [10].

Халькопирит-сфалерит-галенитовая стадия минерализации началась с отложения халькопирита, цементирующего обломки кварца и рудных минералов предыдущей стадии. Обломки халькопирита в свою очередь цементируются сфалеритом и стanniном. Эти минералы испытали внутривластидное дробление, после чего кристаллизовался сереброносный галенит-1. В конце стадии отлагались буланжерит и первые генерации фрейбергита и пираргирита с незначительным количеством сфалерита-3. В ходе второй стадии наиболее отчетливо проявилось последовательное уменьшение активности меди, цинка и свинца в растворе, вплоть до появления серебро-сурьмяных минералов. Кристаллизация сереброносного галенита с включениями серебряных минералов могла происходить в нейтральной-слабощелочной среде ($pH = 6,5$) при повышенных значениях Eh [7].

Стадия сульфосолей серебра. Минеральные ассоциации сульфосолей серебра были наложены на ранее сформированные гидротермальные руды, используя для локализации преимущественно межзерновые пространства и тонкие извилистые трещины отрыва, секущие жилы и прослеживающиеся во вмещающих породах на некотором удалении от рудных тел. Стадия сульфосолей серебра началась с отложения фрейбергита-2 и закончилась выделением акантита и самородного серебра. Минералы серебра образуют ряд парагенетических ассоциаций, имеющих индикаторное значение не только для определения физико-химических условий минералообразования, но и при оценке продуктивности оруденения подобного типа. К их числу относятся парагенезисы фрейбергита с диафоритом и фрейбергита с миаргиритом, отлагавшиеся при 300—200°С в условиях повышенных относительных парциальных давлений серы ($f_{S_2} > 10^{-14}$ атм) и кислорода ($f_{O_2} > 10^{-33}$ атм). В конце стадии отлагался пираргирит-стефанитовый парагенезис при температурах до 150°С в условиях повышенного относительного парциального давления серы ($f_{S_2} > 10^{-20}$ атм) и пониженного — кислорода ($f_{O_2} < 10^{-50}$ атм), в восстановительной обстановке из слабощелочных растворов [6].

В обобщенном виде процесс рудообразования характеризуется последовательной сменой во времени сульфидов железа сульфидами меди, затем цинка и далее свинца, которые в свою очередь сменяются сульфосолями. В отложении последних также прослеживается определенная последовательность, заключающаяся в кристаллизации первоначально свинцово-сурьмяных, далее медно-сурьмяных серебро-содержащих, затем — свинцово-серебро-сурьмяных и, наконец, серебро-сурьмяных соединений. Завершается процесс отложением алларгентума, сульфида серебра (акантита) и самородного серебра. Характерной особенностью процесса рудоотложения является также отчетливое преобладание в жилах сурьмяных серебро-содержащих минералов при почти полном отсутствии мышьяковых и повышение в составе минералов концентрации серебра от ранних к поздним вплоть до появления самородного серебра.

В целом для серебро-галенит-сфалеритового типа оруденения к концу стадии характерна более восстановительная обстановка, чем в начале, более низкое относительное парциальное давление кислорода, более высокие значения pH среды. Это проявляется в отложении сложных сульфосолей серебра в начале стадии и появлении самородного серебра и акантита — в ее конце.

К важнейшим отличиям минерального состава оруденения серебро-галенит-сфалеритового типа от месторождений золото-серебряной формации относится повышенное содержание в рудах сульфидов и, в первую очередь, полиметаллов и отсутствие в них самородного золота. В то же время они сопоставимы по набору минералов серебра, среди которых преобладают его сульфоантимониты.

По своим минералого-генетическим особенностям описываемые жилы характеризуются известным сходством с серебро-свинцовыми месторождениями Якутии [2]. Вместе с тем они близки по геологическому положению и минеральному составу руд к серебро-полиметаллическим месторождениям Восточного Карамара (Средняя Азия).

ВЫВОДЫ

1. В Охотско-Чукотском вулканогенном поясе развиты сереброносные галенит-сфалеритовые жилы, являющиеся самостоятельным типом серебряного оруденения, в составе которых выявлена группа минералов серебра — высокосеребристый фрейбергит, пираргирит, стефанит, а также более редкие диафорит, миаргирит, полибазит, алларгентум, акантит и самородное серебро.

2. Получены новые данные об особенностях химического состава, определены межплоскостные расстояния и параметры элементарной ячейки большинства серебряных минералов.

3. Выявлены фрейбергиты, содержание серебра в которых колеблется в широких пределах — от 18,50 до 46,04 мас. %, и установлена фазовая неоднородность высокосеребристых разновидностей фрейбергита.

4. Выявлены типоморфные парагенетические ассоциации минералов (фрейбергит-диафоритовая, фрейбергит-миаргиритовая, пираргирит-миаргиритовая, пираргирит-стефанитовая), которые имеют индикаторное значение как для оценки физико-химических условий минералообразования, так и для установления продуктивности оруденения данного типа.

5. Установлена стадийность процесса минералообразования, характеризующегося последовательной сменой во времени сульфидов железа сульфидами меди, цинка, свинца, а последних — сульфосолями свинца, меди и серебра.

6. Полученные данные показывают, что процесс минералообразования происходил на фоне постепенного падения температуры (от 300 до 150°С и ниже), а также понижения парциального относительного давления кислорода и характеризовался при завершении более восстановительной обстановкой и повышением щелочности растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин П. В., Еремин Р. А., Тренина Т. И. Стефанит из золото-серебряного рудопроявления на Северо-Востоке СССР. — Докл. АН СССР, 1969, т. 186, N 4, с. 908—910.
2. Индолев Л. Н., Невойса Г. Г. Серебро-свинцовые месторождения Якутии. Новосибирск, 1974. 220 с.
3. Мозгова Н. Н., Цепин А. И. Блеклые руды (Особенности химического состава и свойств). М.: Наука, 1983. 279 с.
4. Некрасов И. Я., Чевычелов В. Ю. Парагенезисы серебро-сурьмяных минералов и экспериментальное изучение системы Ag—Sb—S в сухих и гидротермальных условиях при 110—400°С. — В кн.: Очерки физико-химической петрологии, вып. IX. М.: Наука, 1980.
5. Некрасов И. Я., Сорокин В. И., Конюшок А. А. Физико-химический анализ минеральных парагенезисов сурьмяных и золото-сурьмяных месторождений. — Сов. геология, 1981, N 6, с. 113—122.
6. Сахарова М. С., Брызгалов И. А., Чевычелов В. Ю. Парагенезисы минералов серебра в вулканогенных гидротермальных образованиях/Тез. докл. XIII конгресса ММА. Болгария, 1982.
7. Геохимия серебра сульфидных месторождений Центрального Казахстана и Рудного Алтая. Алма-Ата: Наука, 1975. 295 с.
8. Юшкин Н. П., Макеев А. Б. Типоморфизм сфалерита Пайхойско-Новоземельской провинции. — В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов/Материалы XI съезда ММА. Новосибирск, 1978. Москва, 1980, с. 245—255.
9. American Society for Testing Materials. Philadelphia, 1972.
10. Clark H. A. Heating Experiments on Gudmundite. — Miner. Mag., 1966, vol. 35, N 276, p. 1123—1125.
11. Riley J. F. The Tetrahedrite-Freibergite Series with Reference to the Mount Isa Orebody. — Miner. Dep., 1974, N 9, p. 117-124.