

## **Ассоциации, химизм, неоднородность и условия образования серебросодержащей блеклой руды Мангазейского серебро-полиметаллического месторождения (Восточная Якутия)**

Мангазейское серебро-полиметаллическое месторождение в Западном Верхоянье расположено в 400 км к северо-востоку от г. Якутска, Республика Саха (Якутия). Месторождение локализовано в Западно-Верхоянском секторе Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП), который протягивается вдоль северо-восточной окраины Сибирского континента на 2000 км при ширине 500 км. Месторождение залегает среди мощных (до 9–11 км) песчано-сланцевых толщ верхоянского комплекса от среднекарбонового до раннепермского возраста. Рудные тела, представленные субпластовыми и секущими жилами, зонами прожилков, минерализованных брекчий и дробления, штокверками, приурочены к восточному крутому крылу присводовой части асимметричной сундучной Эндыбальской антиклинали.

Месторождение является одним из крупнейших месторождений Ag России: установленные ресурсы составляют 800 т Ag при среднем его содержании 909 г/т, а предполагаемые ресурсы – 2 250 т Ag при среднем содержании 457 г/т. Прогнозные ресурсы по категориям P1 + P2 оцениваются в 28 000 т Ag [Аристов, Некрасов, 2010]. Для успешного освоения руд необходимо знание о закономерностях размещения и минералах-носителях серебра и других высокотехнологичных металлов.

Блеклые руды, или минералы группы тетраэдрита, имеют обобщенную формулу  $M^{(2)}A_6M^{(1)}(B_4C_2)^{X(3)}D_4S^{(1)}Y_{12}S^{(2)}Z$ , где A = Cu<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, □ (вакансия); B = Cu<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>; C = Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cu<sup>+</sup>, Fe<sup>3+</sup>; D = Sb<sup>3+</sup>, As<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup>, Te<sup>4+</sup>; Y = S<sup>2-</sup>, Se<sup>2-</sup>; Z = S<sup>2-</sup>, Se<sup>2-</sup>, □ [Biagioni et al., 2020] и являются наиболее сложной изоморфной серией среди сульфосолей из-за многокомпонентности и изо- и гетеровалентных замещений.

Блеклые руды на месторождении являются основным концентратом Ag, Sb и Cu. Эти металлы также концентрируются в сульфоантимонитах Ag (пираргирите, миаргирите, стефаните) и Ag-Pb (диафорите, овихеите, фрейеслебените). На месторождении эти минералы находятся в тесных сростаниях. Ранее блеклые руды были кратко описаны в работе [Аникина и др., 2016], которая была посвящена условиям образования месторождения, но не обстановке отложения сереброносных минеральных ассоциаций с блеклыми рудами. Целью данной работы является изучение парагенетических ассоциаций, химического состава и оценка условий образования блеклых руд.

Взаимоотношения минералов в рудах изучены на оптическом микроскопе Olympus BX-51, зональность блеклых руд – с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) вдоль профилей, перпендикулярных зонам зональности. РСМА выполнен в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН (ЦКП «ИГЕМ-Аналитика», аналитик С.Е. Борисовский) на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200, оснащенный пятью волновыми спектрометрами при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда на цилиндре Фарадея 20 нА и диаметре зонда 1 мкм. Время экспозиции при анализе основных элементов составляло 10–20 с, элементов-примесей – 20–40 с. Поправки рассчитывались по методу ZAF в программе фирмы JEOL. Количественный анализ в точках вдоль профиля идентичен обычному анализу. Выбор точек разреза в нужном направлении с заданным интервалом формировался автоматически с сохранением на всем протяжении рентгеновского фокуса. Точное положение

ние начала и конца разреза контролировалось по нагару. Минимальный шаг разреза, равный 1 мкм, определен, исходя из размера области рассеяния электронного пучка в исследуемой матрице при описанных выше условиях анализа. Выполнено 84 анализа по одному профилю в зональном агрегате блеклой руды.

Блеклые руды обнаружены в кварц-карбонат-сульфидных рудах, в которых они образуют сростания с галенитом, пираргиритом, диафоритом, сфалеритом, станнином, стефанитом, сидеритом и арсенопиритом в интерстициях между зернами кварца и карбоната (рис. 1). Блеклые руды и галенит содержат мономинеральные включения серебросодержащих минералов (пираргирита, диафорита, мларгирита) или их сростания (рис. 1в). Сфалерит, галенит и блеклые руды образуют сростания с ровными границами (рис. 1б). Наблюдались станнин-блекловорудно-галенитовые агрегаты, образующие секущие просечки в сфалерите и замещающие его. Блеклые руды корродируют зерна кварца и образуют псевдоморфозы по периферии кристаллов (рис. 1а).

Блеклые руды на месторождении представлены чистым сурьмянистым членом с соотношением  $Sb/(Sb+As)$  от 0.98 до 1.00. В двух анализах соотношение  $Sb/(Sb+As)$  равно 0.92 и 0.89 и в единичном случае – мышьяковистым с соотношением  $Sb/(Sb+As)$  0.44 (рис. 2а). Содержание Fe варьирует в широких пределах: соотношение  $Fe/(Fe+Zn)$  практически непрерывно изменяется от 0.01 до 0.79.

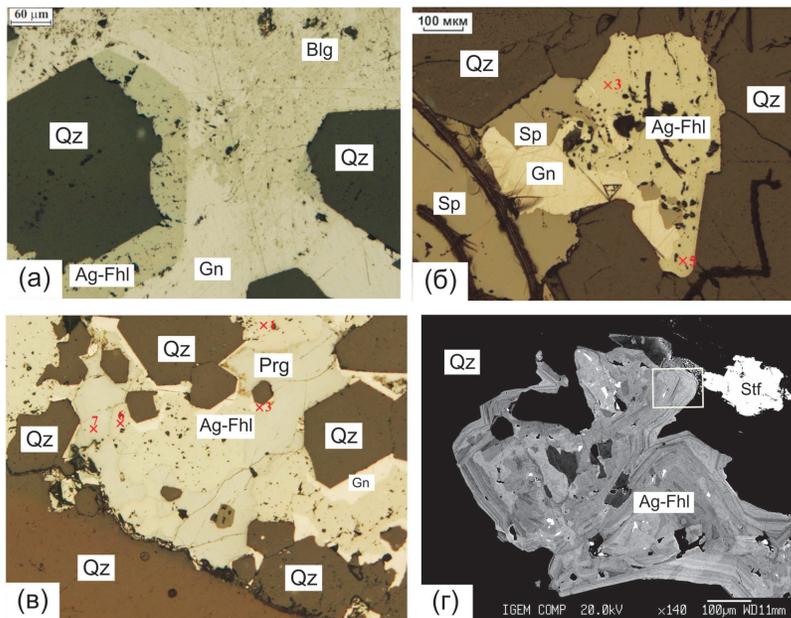


Рис. 1. Сростание серебросодержащей блеклой руды с минералами в рудах Мангазейского месторождения: а) сростание галенита (Gn), блеклой руды (Ag-Fhl) и буланжерита (Blg), в котором блеклая руда по периферии псевдоморфно замещает кварц (Qz) с сохранением первоначальных очертаний хорошо образованных граней кристаллов кварца, а галенит с буланжеритом имеют тесные и тонкие прорастания; б) сростания сфалерита (Sp), галенита и блеклой руды со взаимными и ровными границами в интерстициях между зернами кварца; в) сростание галенита, блеклой руды и пираргирита (Prg) в интерстициях между зернами кварца, где галенит образует каймы вокруг кристаллов кварца, на контакте с галенитом и пираргиритом у кварца сохраняется первичная идиоморфная форма кристаллов, а блеклая руда корродирует зерна кварца; г) зонально-неоднородный агрегат блеклой руды в интерстициях между зернами кварца в сростании со стефанитом (Stf).

Фото а–в – отраженный свет, г – BSE.

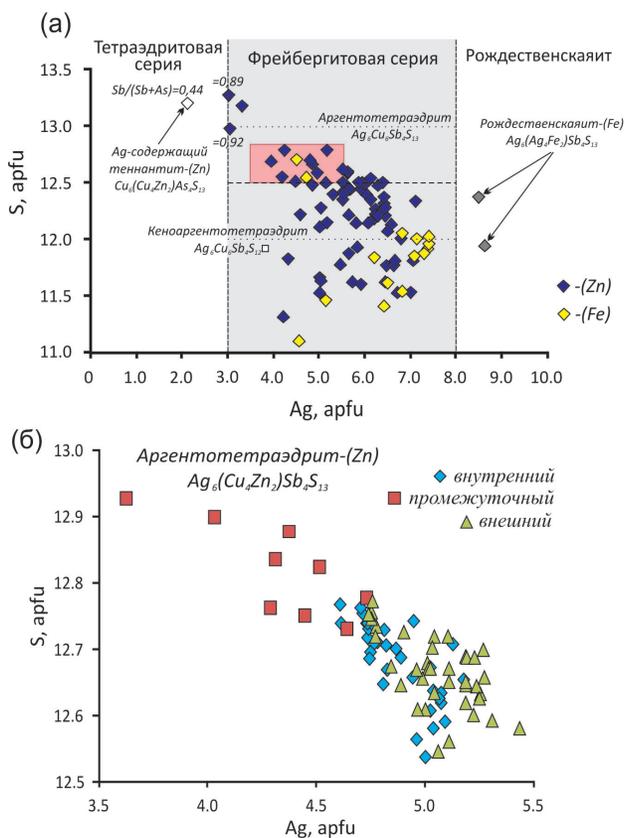


Рис. 2. Соотношение содержаний в формульных коэффициентах (apfu) S и Ag в блеклой руде Мангазейского месторождения (а) и в зонально-неоднородном агрегате блеклой руды (б).

Составы взяты из работы [Аникина и др., 2016]. Пунктирными линиями показаны границы между минеральными видами и сериями [Biagioni et al., 2020]. Прямоугольником на рис. 2а обозначена область составов, представленная на рис. 2б.

Из элементов-примесей блеклая руда содержит до 0.75 мас. % Pb и до 0.20 мас. % Bi. Содержание Sn обычно не превышает 0.20 мас. %, но есть четыре анализа, где его концентрации значительно отличаются и составляют 0.64, 0.77, 1.41 и 1.83 мас. %. В одном из анализов (содержание Sn 1.41 мас. %) блеклая руда тесно сростается со станнином.

Согласно номенклатуре тетраэдритовой группы [Biagioni et al., 2020] по содержанию Ag блеклые руды Мангазейского месторождения в подавляющем большинстве относятся к фрейбергитовой серии (рис. 2а): содержание Ag непрерывно меняется от 18.27 до 39.16 мас. % (соотношение  $Ag/(Ag+Cu)$  0.30–0.69). В порядке уменьшения встречаются кеноаргентотетраэдрит-(Zn), кеноаргентотетраэдрит-(Fe), аргентотетраэдрит-(Zn) и аргентотетраэдрит-(Fe), два анализа лежат в области рождественскаяита-(Fe) (Ag 8.48 и 8.60 ф.к.) и один анализ относится к Ag-содержащему теннантиту-(Zn) (Ag 2.11 ф.к.) (рис. 2а).

Следует отметить, что кеноаргентотетраэдрит-(Zn), аргентотетраэдрит-(Zn) и рождественскаяит-(Fe) не являются официально утвержденными Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной Минералогической Ассоциации видами блеклых руд [Biagioni et al., 2020]. В работе [Biagioni et al., 2020] отмечено, что в природе были встречены только железистые аргентотетраэдрит и кеноаргентотетраэдрит. На

Мангазейском месторождении преимущественно встречаются цинкистые аргентотетраэдрит и кеноаргентотетраэдрит, в которых Zn преобладает над Fe.

Корреляция между соотношениями  $Sb/(Sb+As)$  и  $Fe/(Fe+Zn)$  отсутствует. Также не установлена взаимозависимость между содержаниями Fe и Ag, но примечательно, что наиболее серебристыми разностями являются блеклые руды с высокими содержаниями Fe (рис. 2а). Между содержаниями Ag и S наблюдается слабая отрицательная корреляция (рис. 2а).

Блеклая руда Мангазейского месторождения нередко зональна и неоднородна (рис. 1г). Нами изучен один участок зонально-неоднородного агрегата (выделенный прямоугольником фрагмент на рис. 1г). По данным РСМА этот участок представлен аргентотетраэдритом-(Zn), демонстрирующим неоднородные ритмы и ритмы с осцилляторной зональностью и сложными взаимоотношениями между зонами. Ритмы с тонкими осцилляциями приурочены к периферическим частям агрегата блеклой руды к контакту с кварцем. РСМА зональной блеклой руды вдоль профиля, пройденного перпендикулярно зональности, выявил разные области составов и разные тренды изменения состава (рис. 2б). Во внутреннем ритме наблюдаются незначительные колебания Ag в интервале 4.61–5.18 ф.к. (в среднем, 4.89 ф.к.) на расстоянии 35 мкм. В промежуточном ритме установлен резкий скачок содержания Ag от 3.63 до 5.12 ф.к. на расстоянии 10 мкм. Во внешнем ритме обнаруживается слабое увеличение содержания Ag от 4.72 до 5.53 ф.к. на расстоянии 35 мкм. В промежуточном ритме отмечаются более высокие содержания S и наименьшие содержания Ag по сравнению с внутренним и внешним ритмами (рис. 2б). Корреляция между элементами представлена в таблице.

Серебро имеет сильную отрицательную корреляцию с Cu и S на всем изученном интервале зонально-неоднородного агрегата аргентотетраэдрита-(Zn) (коэффициент корреляции  $r = -0.97 \dots -0.99$  и  $r = -0.74 \dots -0.87$ , соответственно). Между Zn и Fe сильная отрицательная корреляция наблюдается во внутреннем и промежуточном ритмах ( $r = -0.72$  и  $-0.90$ , соответственно) и практически отсутствует во внешнем ( $r = -0.13$ ). В промежуточном ритме установлена корреляция между Zn(Fe) и Ag(Cu): сильная положительная между Zn-Ag ( $r = 0.83$ ) и сильная отрицательная между Zn-Cu, Fe-Ag ( $r = -0.83$ ). Таким образом, для элементов более значимая корреляция наблюдается во внутренней части изученного участка (в промежуточном ритме).

Для сосуществующих кеноаргентотетраэдрита-(Zn) с содержанием 34.16–36.62 мас. % Ag (Ag 6.40–6.99, Zn 1.38–1.76 и S 11.53–12.32 ф.к.) и низкожелезистого сфалерита (0.3 мол. % FeS) рассчитана температура по данным распределения между ними Fe и Zn [Sack, Loucks, 1985]. Получено три значения температур кристаллизации от 165 до 280 °С, которые согласуются с температурами гомогенизации флюидных включений в сфалерите (179–222 °С) [Аникина и др., 2016], и температурой отложения серебро-полиметаллической ассоциации (125–280 °С), оцененной по серо-изотопному сфалерит-галенитовому геотермометру [Аникина и др., 2010].

Таблица

**Коэффициенты корреляций между элементами в зонально-неоднородном аргентотетраэдрите-(Zn)**

Ритм	Внутренний				Промежуточный				Внешний			
	Zn/Fe	Cu/Ag	Sb/As	S	Zn/Fe	Cu/Ag	Sb/As	S	Zn/Fe	Cu/Ag	Sb/As	S
Ag	-0.15	<b>-0.97</b>	0.34	<b>-0.74</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.99</b>	0.67	<b>-0.86</b>	-0.22	<b>-0.98</b>	0.16	<b>-0.87</b>
	0.50	–	-0.19		<b>-0.83</b>	–	-0.56		0.60	–	-0.42	
Zn	–	0.12	-0.33	-0.02	–	<b>-0.83</b>	0.51	<b>-0.82</b>	–	0.29	-0.66	-0.11
	<b>-0.72</b>	-0.15	0.28		<b>-0.90</b>	<b>0.83</b>	-0.35		-0.13	-0.22	-0.37	

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения с высокой корреляцией ( $>0.7$  и  $<-0.7$ ).

Таким образом, установлено, что на Мангазейском серебро-полиметаллическом месторождении блеклые руды относятся к фрейбергитовой серии и представлены преимущественно кеноаргентотетраэдритом-(Zn), кеноаргентотетраэдритом-(Fe) и аргентотетраэдритом-(Zn). В зональных зернах присутствуют неоднородные ритмы и ритмы с осцилляторной зональностью, в которых проявлены разные тренды изменения состава. Определены температуры отложения кеноаргентотетраэдрита-(Zn), сосуществующего со сфалеритом (165–280 °С), которые согласуются с температурами гомогенизации флюидных включений в сфалерите и температурой отложения серебро-полиметаллической ассоциации, оцененной по серо-изотопному сфалерит-галенитовому геотермометру.

## Литература

Аникина Е.Ю., Бортников Н.С., Клубник Г.К., Гамянин Г.Н., Прокофьев В.Ю. Мангазейское Ag–Pb–Zn жильное месторождение в осадочных породах (Саха-Якутия, Россия): минеральные ассоциации, флюидные включения, стабильные изотопы (С, О, S) и особенности образования // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 3. С. 206–238.

Аникина Е.Ю., Гамянин Г.Н., Бортников Н.С. Изотопный состав серы сульфидов сереборудного месторождения Мангазейское (Восточная Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 6. С. 534–552.

Аристов В.В., Некрасов А.И. Верхоянская сереборудная провинция. Перспективы развития и освоения минерально-сырьевой базы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. № 1. С. 21–29.

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moëlo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. The tetrahedrite group: Nomenclature and classification // American Mineralogist. 2020. Vol. 105. № 1. P. 109–122.

Sack R.O., Loucks R.R. Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantite: constraints on the interdependence of the Ag-Cu, Fe-Zn, Cu-Fe, and As-Sb exchange reactions // American Mineralogist. 1985. Vol. 70. № 11–12. P. 1270–1289.

**М.А. Павлова, Н.С. Червоник**

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург  
milana.a.pavlova@yandex.ru*

### **Вещественные и морфологические особенности самородного золота из россыпей ручьев Левый Джанку и Гранитного (Хабаровский край)** (научный руководитель – к.г.-м.н. С.В. Петров)

В работе рассмотрены особенности строения и состава золота из россыпей, приуроченных к двум соседним ручьям Левый Джанку и Гранитному, берущих начало с возвышенностей (960 и 1200 м, соответственно), дренирующих породы Ульбейского массива и впадающих в р. Сибегу. Россыпи обрабатываются ООО ГПП Марекан не первое десятилетие, однако до сих пор в этом районе значимой коренной минерализации золота не обнаружено. Целью работы является определение возможных параметров коренного источника золота на основе материалов, отобранных из россыпей ручьев Левый Джанку и Гранитного.

В административном плане район работ расположен в Хабаровском крае, в Охотском районе, примерно в 200 км на север от пос. Охотск, в районе среднего течения р. Ульбея, на ее правом берегу. В геологическом отношении изучаемый район находится в пределах центральной части Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса, на восточной краевой части Ульбейского массива (на северо-востоке листа Р-54-XXXVI), сложенного преимущественно