

УДК 553.411:553.499

ИНВЕРСИЯ РЕЖИМА СЕРЫ В РУДОНОСНОМ РАСТВОРЕ И ЕЕ РОЛЬ В ОБРАЗОВАНИИ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕ-ИНДИГИРСКОГО РАЙОНА ЯКУТИИ)

© 2004 г. Г. Ю. Акимов

Представлено академиком А.А. Маракушевым 07.12.2003 г.

Поступило 17.12.2003 г.

При изучении последовательности кристаллизации рудных минералов на ряде золото-кварцевых месторождений Верхне-Индигирского района Якутии (Нагорное, Двойное, Клич, Контрольное, Хангалас, Диринь-Юрях, Тарынское, Кус-Юрюе, Пиль, Малютка, Жданное, Сопка Кварцевая) установлена инверсия режима серы в гидротермальном растворе, существенно влияющая на рудоотложение. Инверсия заключается в росте и последующем падении $\mu_{\text{H}_2\text{S}}$ гидротермального раствора на фоне общего понижения температуры и концентрации солей. При падении $\mu_{\text{H}_2\text{S}}$ ниже равновесия бурнонит + пирит = галенит + халькопирит происходит осаждение золота.

Изученные месторождения сформировались в период мезозойского тектогенеза, связанного с коллизией Колымо-Омолонского составного террейна и Северо-Азиатского кратона, произошедшей в конце юры – начале неокома [1].

Месторождения представлены кварцевыми жилами и минерализованными зонами дробления, залегающими среди песчаников и алевролитов верхоянского комплекса (P_2-T_3). Метаморфические преобразования вмещающих пород достигают хлорит-серицитовой ступени. Рудные тела сложены кварцем (до 99%), карбонатами (до 10%), хлоритом-рипидолитом (до первых процентов) и альбитом (до первых процентов). Содержание сульфидов 1–3%. Набор рудных минералов простой, включает золото, арсенопирит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, тетраэдрит, бурнонит, рутил, редко сульфоантимониты Pb группы буланжерита и моноклинный пирротин. По результатам изучения флюидных включений (аналитики В.Ю. Прокофьев и Т.Л. Крылова, ИГЕМ РАН) и минеральных геотермометров месторождения сформированы из бикарбонатно-

хлоридно-натриевых растворов в температурном интервале 330–160°C при давлениях 1200–10 бар и концентрации солей 8.1–3.2 мас. %-экв NaCl. Концентрация солей связана прямой зависимостью с температурой и достигает минимума при отложении золота.

По минеральному составу изученные месторождения, согласно классификации Г.Н. Гамянина [2], делятся на два типа: сульфоантимонитовый и полиметаллический. Типовые отличия выражены присутствием в рудах сульфоантимонитового типа тетраэдрита и бурнонита при отсутствии этих минералов в рудах полиметаллического типа. По нашим наблюдениям, в месторождениях полиметаллического типа отсутствуют самостоятельные выделения халькопирита, который встречается исключительно в виде эмульсии в сфалерите. В то же время в них может встречаться предзолотой буланжерит. Очевидно, что отсутствие в месторождениях полиметаллического типа тетраэдрита и бурнонита связано не столько с низкой активностью сурьмы, сколько с бедностью флюида этих месторождений медью. По приближению к гранитам и с увеличением эрозионного среза месторождений происходит смена сульфоантимонитового типа руд полиметаллическим.

Руды изученных месторождений характеризуются однотипной последовательностью минералотложения, представленной одной стадией, разделённой на рипидолит-кварцевую, пирит-арсенопирит-кварцевую и кварц-золото-полисульфидную (продуктивную) подстадии.

Рипидолит-кварцевая подстадия включает рутил-альбит-кварцевый и кальцит-рипидолит-кварцевый парагенезисы. Пирит-арсенопирит-кварцевая подстадия представлена Mg-сидерит-серицит-кварцевым, анкерит-пирит-серицит-кварцевым и Fe-доломит-арсенопирит-серицит-кварцевым парагенезисами.

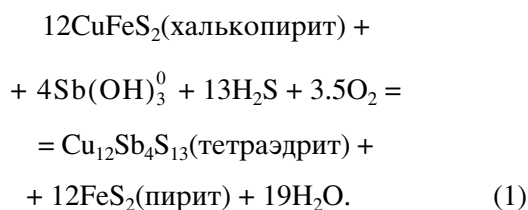
Минералообразование кварц-золото-полисульфидной (продуктивной) подстадии имеет свою специфику для руд сульфоантимонитового и полиме-

Таблица 1. Последовательность минералообразования кварц-золото-полисульфидной (продуктивной) подстадии в месторождениях сульфоантимонитового и полиметаллического типов

Минерал	Минеральные типы месторождений											
	сульфоантимонитовый					полиметаллический						
						А			Б			
	Парагенезисы											
1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3	4	
Кварц												
Сфалерит	—								—			
Халькопирит	—					—			—			
Тетраэдрит		—										
Пирит		—										
Бурнонит		—										
Галенит			—									
Буланжерит				—								
Золото												
	Примеры месторождений											
	Нагорное, Диринь-Юрях, Пиль, Малютка					Хангалас, Двойное, Клич, Контрольное, Сопка Кварцевая, Кус-Юрюе			Тарынское, Жданное			

таллического типов при сохранении общей направленности процесса (табл. 1).

На месторождениях сульфоантимонитового типа кварц-золото-полисульфидная подстадия обычно представлена пятью парагенезисами: халькопирит-сфалеритовым, бурнонит-пирит-тетраэдритовым, бурнонит-халькопиритовым, золото-галенит-халькопирит-бурнонитовым и золото-галенит-халькопирит-тетраэдритовым. Смена парагенезисов обусловлена химическими реакциями, фиксируемыми минеральными взаимоотношениями в полированных шлифах. Смена халькопирит-сфалеритового парагенезиса бурнонит-пирит-тетраэдритовым фиксируется замещением халькопирита-1 тетраэдритом-1 и пиритом:

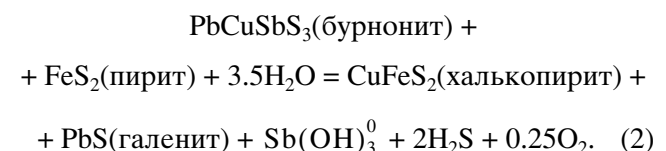


Комплекс $\text{Sb}(\text{OH})_3^0$ в этом и последующих уравнениях выбран, исходя из экспериментальных данных по устойчивости комплексов Sb [3] и низкой сульфидности руд. Комплекс H_2S принят исходя из того, что pH рудоотложения на изученных месторождениях (6.3–7.3) выше нейтральной точки [4].

Тетраэдрит-1 образует на халькопирите-1 коррозионные каймы с многочисленными микропрожилками, от которых в халькопирит растут футляровидные метакристаллы пирита. В основном пирит отлагается вне зоны протекания реакции (1), что обусловлено ее положительным объемным эффектом в 21%.

Смена бурнонит-пирит-тетраэдритового парагенезиса бурнонит-халькопиритовым связана с течением реакции (1) в обратном направлении. При этом образуются коррозионные прожилки халькопирита-2 в тетраэдрите-1 и псевдоморфозы халькопирита-2 по пириту и тетраэдриту-1, содержащие корродированные реликты этих минералов.

Смена бурнонит-халькопиритового парагенезиса золото-галенит-халькопирит-бурнонитовым фиксируется замещением сростаний бурнонита и пирита равновесным халькопирит-галенитовым агрегатом, согласно уравнению



При этом в отсутствие пирита продолжается кристаллизация бурнонита.

Переход к заключительному золото-галенит-халькопирит-тетраэдритовому парагенезису от-

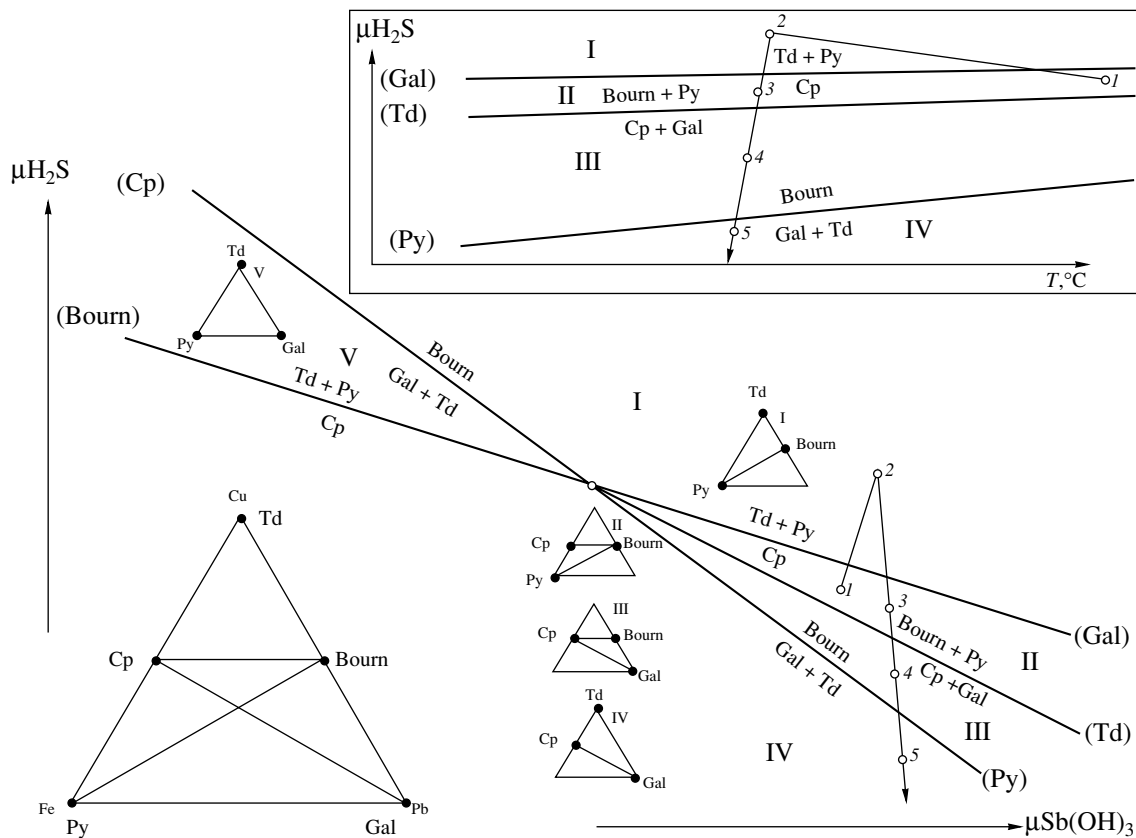
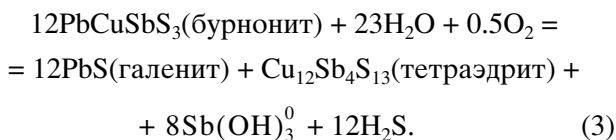


Рис. 1. Диаграммы зависимости парагенезисов кварц-золото-полисульфидной подстадии в рудах сульфидантимонитового типа от $\mu\text{H}_2\text{S}$ и $\mu\text{Sb}(\text{OH})_3$, $\mu\text{H}_2\text{S}$ и T , °C. Линиями, соединяющими точки с цифрами, показан тренд образования парагенезисов. Номера точек соответствуют номерам минеральных парагенезисов в табл. 1.

мечен замещением бурнонита галенитом и тетраэдритом-2:



На описанную последовательность парагенезисов могут влиять следующие факторы: T , °C, $\mu\text{H}_2\text{S}$, $\mu\text{Sb}(\text{OH})_3^0$ и μO_2 , главными из которых являются T , °C и $\mu\text{H}_2\text{S}$. Влияние μO_2 на рудоотложение можно не учитывать, так как реакции (1), (2), (3) не являются окислительно-восстановительными.

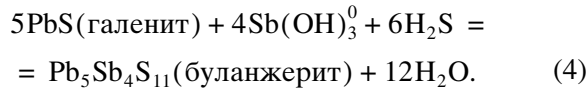
Как видно из уравнений (1), (2), (3), описанная смена парагенезисов сопровождается ростом и последующим падением $\mu\text{H}_2\text{S}$, что наглядно иллюстрируется диаграммами потенциалов (рис. 1) для системы с инертными Fe, Cu, Pb и вполне подвижными Sb и S. Методика построения диаграмм приведена в работе [5]. Диаграммы строились для пяти реально наблюдаемых фаз: халькопирита (Cp), тетраэдрита (Td), пирита (Py), бурнонита (Bourn) и галенита (Gal), содержащих принятые для данной системы инертные компо-

ненты. Согласно правилу фаз, система с тремя инертными компонентами, состоящая из пяти минералов, описывается однолучковой диаграммой с пятью лучами, которые обозначаются взятым в скобки символом минерала, не участвующим в реакции. На рис. 1 это моновариантные линии (Gal) (Td) (Py) (Bourn) (Cp), разделяющие пять полей, обозначенных римскими цифрами. В принятой нами системе из пяти минералов возможны три реакции (1), (2) и (3). Линией, соединяющей точки с цифрами, на диаграммах показан тренд последовательности образования минеральных парагенезисов.

Таким образом, на изученных месторождениях сульфидантимонитового типа наблюдается регрессивная последовательность рудоотложения, которая сопровождается ростом $\mu\text{H}_2\text{S}$ до точки инверсии-2 (расположенной выше равновесия халькопирит = тетраэдрит + пирит), достигнув которой $\mu\text{H}_2\text{S}$ начинает падать. При падении $\mu\text{H}_2\text{S}$ ниже равновесия бурнонит + пирит = галенит + халькопирит происходит осаждение золота.

При рассмотрении месторождений полиметаллического типа целесообразно их разделение на

подтипы А (без буланжерита) и Б (с буланжеритом) (табл. 1). В месторождениях подтипа А продуктивная подстадия представлена халькопирит-сфалеритовым, пирит-галенитовым и золото-галенитовым парагенезисами. В месторождениях подтипа Б – халькопирит-сфалеритовым, пирит-галенитовым, буланжеритовым и золото-галенитовым парагенезисами. Появление в подтипе Б буланжерита связано с замещением этим минералом галенита-1:



Смена буланжеритового парагенезиса золото-галенитовым обусловлена течением реакции (4) в обратном направлении.

Протекание реакции (4) сначала в прямом, а затем в обратном направлении свидетельствует о том, что рудоотложение в месторождениях полиметаллического типа, так же как и в месторождениях сульфидно-антимонитового, связано с инверсией $\mu\text{H}_2\text{S}$ в растворе.

Наиболее вероятной причиной инверсии $\mu\text{H}_2\text{S}$ и рудоотложения является разбавление гидротермальных растворов метеорными водами, что косвенно подтверждается постепенным понижением концентрации солей во флюиде с 8,1 мас. %-экв NaCl при отложении сфалерита до 3,2 мас. %-экв NaCl при отложении золота и региональным характером установленной закономерности.

Экспериментальные [6, 7] и расчетные [8] исследования форм переноса золота показывают возможность нахождения в гидротермальных растворах хлоридных, гидросульфидных и гидроксидных комплексов золота. Распределение золота между различными комплексами зависит от температуры, pH и окислительного потенциала. Преимущественная концентрация золота в хлоридных комплексах отвечает окисленным растворам (выше буфера пирит-гематит) с низким pH [8]. Гидроксидные комплексы устойчивы при высоких температурах во всем диапазоне pH. Однако с понижением температуры происходит перераспределение золота между гидроксидной и гидросульфидной формами в сторону последней. При давлении 500 бар и температурах ниже 250°C в близонейтральных условиях при окислительном потенциале выше буфера пирит-гематит, практически все золо-

то раствора находится в гидросульфидной форме при резком преобладании комплекса $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ [6, 7]. Согласно экспериментальным данным [6], поля устойчивости гидросульфидных комплексов при давлениях 500, 1000 и 1500 бар практически не смещаются.

Из приведенного обзора специальных работ следует, что наиболее вероятной формой нахождения золота в гидротермальных растворах изученных нами месторождений является гидросульфидная.

Таким образом, осаждение золота при падении $\mu\text{H}_2\text{S}$ в растворе, вероятнее всего, происходит за счет разрушения золото-сульфидных комплексов при понижении общей концентрации H_2S путем разбавления гидротермальных растворов метеорными водами. Формирование бонанцев внутри кварцевых жил отражает подвижную границу смешения ювенильных и метеорных вод. Инверсия $\mu\text{H}_2\text{S}$ в совокупности с другими методами может использоваться при экспрессной оценке перспектив малоизученных золото-кварцевых проявлений.

Автор благодарен В.Л. Русинову, советами которого он пользовался на всем протяжении написания работы; А.А. Маракушеву – за критические замечания, улучшившие статью; В.Ю. Прокофьеву и Т.Л. Крыловой – за термо-криометрические исследования и А.В. Зотову – за консультацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парфёнов Л.М. // Тихоокеан. геология. 1995. Т. 14. № 6. С. 32–43.
2. Гамянин Г.Н. Позднемезозойский магматизм и золотое оруденение Верхне-Индибирского района. М.: Наука, 1971. С. 150–221.
3. Zotov A.V., Shikina N.D., Akinfiyev N.N. // Geochim. et cosmochim. acta. 2003. V. 67. № 10. P. 1821–1836.
4. Гамянин Г.Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойд. М.: ГЕОС, 2001. 221 с.
5. Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 228 с.
6. Benning L.G., Seward T.M. // Geochim. et cosmochim. acta. 1996. V. 60. № 11. P. 1849–1871.
7. Stefansson A. The Stability and Stoichiometry of Gold (I) and Silver (I) Complexes in Hydrothermal Solutions. Zurich, 2002. 142 p.
8. Morrison G.M., Rose W.J., Jaireth S. // Ore Geol. Revs. 1991. № 6. P. 333–364.