

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НАКОПЛЕНИЯ ЗОЛОТА В РУДАХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.П. Молошаг, И.В. Викентьев

В предыдущих исследованиях нами рассматривалась минералогия золота в парагенетических ассоциациях руд колчеданных месторождений Урала [Молошаг, Викентьев, 2001, 2003; Молошаг и др., 2004, 2005a]. В них отражены результаты исследований состава самородного золота и сосуществующих с ним минералов как индикаторов, датчиков физико-химических условий образования руд. Эти данные, на наш взгляд, позволяют применить результаты экспериментальных исследований условий переноса золота в гидротермальных растворах для оценки возможности накопления или рассеяния золота в природных минеральных ассоциациях руд.

Используемые нами геотермометры (пирит-пирротинный, арсенопиритовый, электрум-сфалеритовый и другие) разрабатывались на основе исследований безводных систем. Влияние водных растворов рассматривалось с помощью изотермических диаграмм: летучесть кислорода $\log f_{O_2}$ – кислотность pH. Выбор модели состава растворов, участвующих в переносе золота в период формирования руд кол-

чеданных месторождений, базируется на результатах исследований устойчивости сульфидов в гидротермальных растворах. Исследования парагенетических ассоциаций руд показывают, что основная часть золотосодержащих руд находилась в равновесии с растворами, в которых преобладали частицы H_2S (рис. 1). При образовании пирротиновых руд, в первую очередь магнетитсодержащих их разновидностей, ведущую роль играют частицы HS^- ; для гематитсодержащих разновидностей и, возможно, некоторой части баритсодержащих руд – SO_4^{2-} . Растворы, равновесные с элементарной серой (S) и частицами HSO_4^- , формируются в гипергенных условиях и, возможно, при гальмиролизе сульфидсодержащих отложений в подводных условиях. Исходя из этих предпосылок, мы попытались найти зависимость содержания золота в рудах от физико-химических условий их образования. В табл. 1 приведены результаты анализов представительных проб, для которых, наряду с возможно более полным охватом, приведен их химический состав и наиболее полно

Таблица 1

Содержание золота и серебра в рудах колчеданных месторождений по данным пробирного анализа

Фация	Борнитовая					Халькопиритовая		
Месторождение	Гайское				Карабашское	Гайское		
Проба	502/74	501/74	536/78	507/77	14/82	057	059	
Содержание, г/т								
Au	21,20	2,50	7,90	2,16	1,36	2,54	8,36	
Ag	356,1	694,0	447,4	191,5	940	36,2	97,3	
Ag/Au	16,8	277,6	56,6	88,7	691	14,3	11,6	
Фация	Халькопиритовая							
Месторождение	Карабашское		Блявинское			Сафьяновское		
Проба	15/82	16/82	1/30	1/34	2/7	МК	МЦК	МО
Содержание, г/т								
Au	3,4	4,4	0,20	0,31	0,29	1,01	1,52	2,08
Ag	52,5	66,0	8,8	7,7	12,1	40,98	70,10	
Ag/Au	15,3	15,0	44	24,8	41,7	40,6	46,1	

Примечание. Анализы руд Гайского и Блявинского месторождений выполнены в Полевской лаборатории ПГО «Уралгеология»; Сафьяновского месторождения – в Центральной лаборатории ПГО «Уралгеология». МК – медноколчеданная руда; МЦК – медно-цинковая колчеданная руда; МО – медная руда окисленная.

проведены минералогические исследования [Молошаг, Викентьев, 2003; Молошаг и др. 2005a]. При интерпретации данных по различ-

ным месторождениям нами учитывались анализы рудных компонентов, включая золото, в рядовых и групповых пробах.

В связи с этим,
интерпретация данных

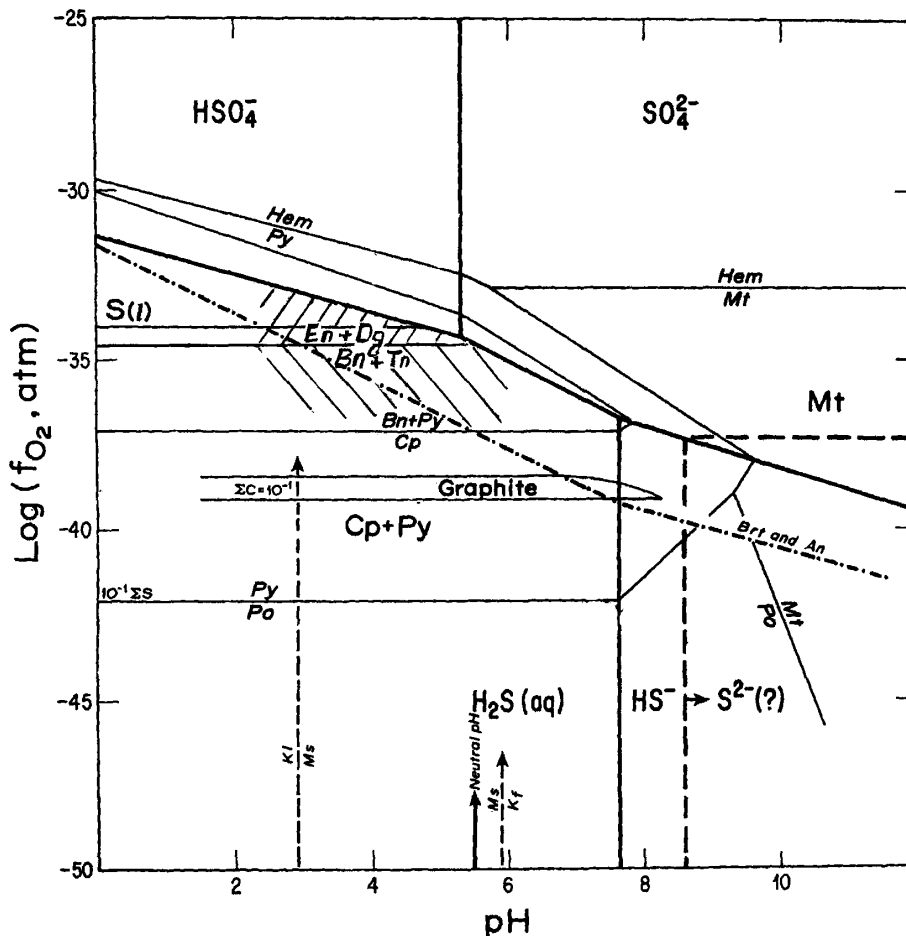


Рис. 1. Положение границ стабильности минералов колчеданных месторождений и гидротермального раствора на диаграмме $\log f_{\text{O}_2}$ – pH при 250 °C по [Crerar, Barnes, 1976] с дополнениями и упрощениями.

Нem – гематит, Py – пирит, Po – пирротин, Mt – магнетит, Bn – борнит, Ср – халькопирит, Dg – дигенит, En – энаргит, Tn – теннантит, Kl – каолинит, Ms – мусковит, An – ангидрит, Kf – калиевый полевой шпат; Brt – барит. Состав раствора (мол. %): $\Sigma S = 0,1$; $\Sigma Ba^{2+} = 10^{-3}$; $\Sigma C = 0,1$; $K^{+} = 0,5$; $Ca^{2+} = 0,1$.

Штриховка с наклоном влево – энаргит-дигенитовая субфация; вправо – борнит-теннантитовая субфация.

РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

о содержании золота в рудах проводилась на основе опубликованных данных по условиям устойчивости сернистых комплексных соединений золота в растворах. Исследования по хлоридным комплексам золота можно использовать только для руд, которые образовались при участии кислых растворов, индикатором чего является замещение гидрослюд каолинитом и пиррофиллитом ($pH < 2$), а также наличие минеральных буферов: пирит-пирротин-магнетит (Py-Po-Mt), пирит-гематит-магнетит (Py-Hm-Mt), кварц-калиевый полевой шпат-мусковит (Q-Kfs-Mu), кварц-альбит-мусковит (Q-Ab-Mu) и других. Во вкрапленных рудах, где отмечаются гидрослюды и отсутствуют гипогенные сульфаты, значения кислотности растворов допускают одновременную устойчивость гидросульфидных и хлоридных комплексов золота (рис. 2). Как один из возможных минералогических индикаторов кислотности можно использовать присутствие в рудах калий- и натрийсодержащих гидрослюдов. Данные минералы характеризуются наличием промежуточных разновидностей с переменным количеством калия, натрия и структурно замещающей их воды. В связи с этим, мы остановились на крайних членах – мусковите и парагоните, которые можно рассматривать как продукты кислотного разложения калиевого и натриевого полевых шпатов [Grondin, Williams-Jones, 2004]. Более широким распространением пользуется альбит [Прокин и др., 1992]. Калиевые полевые шпаты в метасоматитах, сопровождающих колчеданное оруденение, практически не встречаются. Парагонит устойчив в более кислой среде ($pH = 2.5$), по сравнению с мусковитом ($pH = 4.5$). Значение разницы показателя кислотности pH для данных минералов составляет около 2 и сохраняется практически постоянно при различных значениях температуры раствора. В связи с этим, при последующих процессах диагенеза и метаморфизма сульфидов и силикатов для руд халькопиритовой и борнитовой фаций нижний предел показателя кислотности растворов pH снижался до значений, меньших 2.5, только в пиррофиллитсодержащих метасоматитах. В пирротинсодержащих рудах наряду с пиритом и пирротином также отмечается структурно равновесный с ними магнетит, что отвечает пирит-пирротин-магнетитовому буферу. По значению кислотности, растворы являются субщелочными. Крайне редко реализуется моновариантное равновесие пирит-гематит. Отсутствие магнетита в этих рудах го-

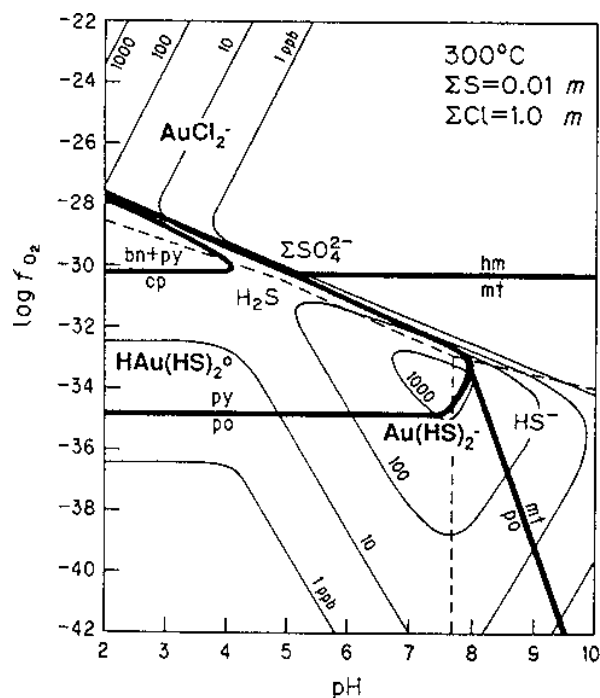


Рис. 2. Растворимость золота (ppb) в виде комплексов $Au(HS)_2^-$ и $AuCl_2^-$ как функция f_{O_2} и pH для $300^\circ C$ в растворах состава $\Sigma S = 0.01\ m$ $\Sigma Cl = 1.0\ m$ по [Hayshi, Ohmoto, 1991]. Обозначения: hm – гематит, остальные те же, что и на рис. 1.

ворит о том, что они формировались в нейтральной или слабо кислой среде (см. рис. 1). Наряду с этим, учитывались парагенетические ассоциации руд с арсенопиритом, для которых на основе экспериментальных исследований и полученных нами значений температуры можно получить оценки pH растворов [Пальянова, Колонин, 1991]. Согласно этим данным, значения pH растворов равновесных с ассоциацией арсенопирит-пирротин изменялись в интервале 3-4; для ассоциации арсенопирит-пирит кислотность растворов повышалась до $pH < 3$. Появление магнетита приводило к снижению кислотности. Баритсодержащие парагенезисы характеризуются промежуточной величиной значений pH между калиевыми гидрослюдами и магнетитом. Роль хлоридных комплексов золота в этих условиях незначительна, ввиду низких значений летучести кислорода и кислотности растворов. При более высоких значениях pH растворимые формы золота представлены гидросульфидными комплексами.

В гидротермальных растворах наиболее детально изучены хлорсодержащие и гидросульфидные комплексные соединения золота и серебра. В модельных и природных раство-

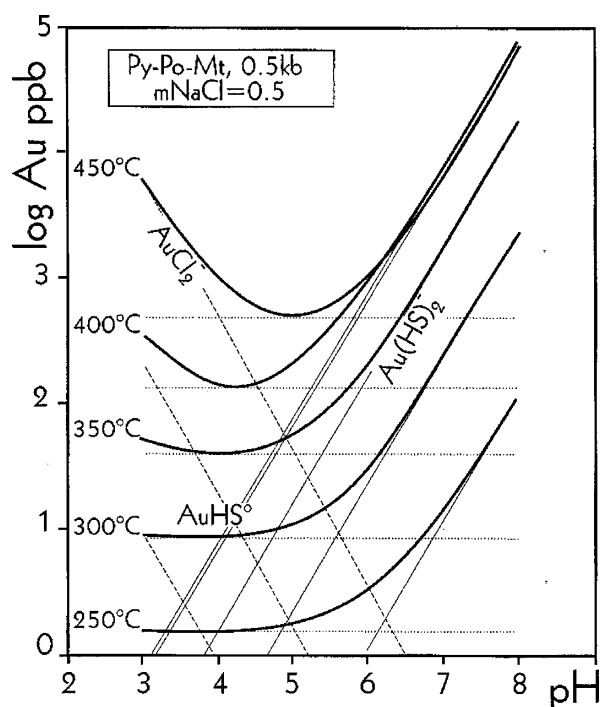


Рис. 3. Контуры суммарных содержаний растворимого золота $\Sigma Au = mAuCl_2^- + mAuHS^0 + mAu(HS)_2^-$ – сплошные жирные линии и относительный вклад $mAuCl_2^-$ (пунктирные линии) и $mAuHS^0$ (точечные линии) как функция температуры (от 250 до 450 °C) и pH во флюиде ($H_2O - NaCl$ 0.5 m), с Py-Po-Mt буфером [Gibert et al., 1998]. Обозначения те же, что и на предыдущих рисунках.

рах хлор, который образует с золотом хлоридные комплексы $AuCl^0$ и $AuCl_2^-$, преобладает над серой. Тем не менее, роль хлора в качестве носителя золота становится заметной только в условиях кислой среды, где преобладает комплекс золота $AuCl_2^-$ [Hayashi, Ohmoto, 1991]. Хлоридные комплексы золота преобладают в кислых растворах при высокой летучести кислорода (при низких значениях активности сероводорода); гидросульфидные комплексы золота – в нейтральных субщелочных растворах. Количество золота в растворе определяется суммой трех соединений: $\Sigma Au = mAuCl_2^- + mAuHS^0 + mAu(HS)_2^-$; нейтральный комплекс золота $AuHS^0$ распространен в условиях слабо кислой среды, а $Au(HS)_2^-$ – в щелочных растворах. Эти данные отражены на рис. 2, 3. Повышение температуры раствора, особенно вблизи критических значений, расширяет область устойчивости хлоридных комплексов золота.

Экспериментальные исследования, таким образом, указывают на резкие различия условий выноса и, соответственно, отложения

благородных металлов из растворов для равновесных с ними минеральных ассоциаций руд колчеданных месторождений. Так, основная часть поля борнитовых руд на диаграммах $\log f_{O_2} - pH$ попадает в поле низких концентраций золота в растворе, независимо от природы лигандов (HS^- , Cl^- и др.) его растворимых комплексных соединений, что является одной из предпосылок повышенных содержаний золота в этих рудах. Растворы, равновесные с пирротиновыми (пирротинсодержащими) рудами, особенно при наличии в них структурно равновесного магнетита (пирит-пирротин-магнетитовый буфер), характеризуются высокими концентрациями растворенного в них золота. В связи с этим, вероятно, на большей части колчеданных месторождений Урала руды выделяемой нами пирротиновой фации относительно бедны золотом по сравнению с рудами халькопиритовой фации. Данная тенденция прослеживается и в пределах отдельно взятых месторождений. Так, во вкрапленных, штокверковых рудах Сафьяновского месторождения, в низах которых отмечаются следы проявления пирротиновой минерализации, включая обогащенные медью их участки, содержания золота в 2-3 раза ниже, чем в залегающих выше по разрезу медно-цинковых рудах, образующихся в условиях халькопиритовой фации. Еще более четко эта тенденция проявляется на Узельгинском месторождении. Весьма обеднены золотом руды месторождений им. 50-летия Октября и Маукского, значительную часть которых составляют пирротиновые руды.

Список литературы

- Молошаг В.П., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я., Тесалина С.Г. Благородные и редкие металлы в борнитовых рудах колчеданных месторождений Урала // Записки ВМО. 2005. Ч. 134. № 3. С. 53-69.
- Молошаг В.П., Грабежесев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я. Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золото-порфировых месторождений Урала // Литосфера. 2004. № 2. С. 30-51.
- Молошаг В.П., Викентьев И.В. Распределение платиноидов и золота в минералах колчеданных месторождений Урала // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2001. С. 161-166.
- Молошаг В.П., Викентьев И.В. Минералогическая интерпретация результатов рационального анализа золота в рудах колчеданных месторождений Урала // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2003. С. 203-210.

РУДООБРАЗОВАНИЕ, МЕТАЛЛОГЕНИЯ,
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Пальянова Г.А., Колонин Г.Р. Арсенопиритсодержащие минеральные ассоциации как индикаторы физико-химических условий гидротермального рудообразования // Геохимия. 1991. № 10. С. 1481-1491.

Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмаилов М.И., Василевская М.Ф., Алешин К.Б. Зональность гидротермально-метасоматических изменений боковых пород // Медноколчеданные месторождения Урала: Условия формирования. Екатеринбург: УрОРАН, 1992. С. 121-139.

Crerar D.A., Darnes H.L. Ore solution chemistry. V. Solubility of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution of 200 to 350 °C // Econ. Geol. 1976. V. 71. № 4. P. 772-794.

Gibert F., Pascal M.-L., Pichavant M. Gold solubility and speciation in hydrothermal solutions: Experimental study of the stability of hydrosulphide complex of gold (AuHS^0) at 350 to 450 °C and 500 bars // Geochim. Cosmochim. Acta. 1998. V. 62. N. 17. P. 2931-2947.

Grondin O., Williams-Jones A.E. The Onaman prospect, Ontario: An unusual occurrence of Cu-bearing Au mineralization in a shear zone // Econ. Geol. 2004. V. 99. N 1. P. 141-156.

Hayashi K., Ohmoto H. Solubility of gold in NaCl- and H_2S -bearing aqueous solutions at 250-350 °C // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. N 8. P. 2111-2126.