

УДК 549.313: 543.77: 546.59

© Молошаг В.П. *, Викентьев И.В. **

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЗОЛОТА
В РУДАХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА**

(Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620151, Екатеринбург, Почтовый пер. 7. E-mail: moloshag@igg.uran.ru)

*** Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. 109017, Москва, Старомонетный пер., 35, E-mail: viken@igem.ru)*

(Представлена д.чл УАГН, О.К.Ивановым)

© Moloshag V.P., Vikentyev I.V.

**MINERALOGICAL INTERPRETATION OF RATIONAL
PHASE ANALYSIS OF GOLD IN ORE MASSIVE SULFIDE
DEPOSITS OF THE URALS**

Автореферат

Методами рационального анализа проводились исследования золота в рудах Гайского, Ворошиловского, Сафьяновского и Блявинского колчеданных месторождений. Повышенная доля свободного золота наблюдается в борнит-содержащих рудах Гайского месторождения. Слабо метаморфизованные руды Сафьяновского и Блявинского месторождений показывают сравнительно высокое количество золота, связанного с сульфидами (от 45 до 79 относит. %) и незначительную долю свободного золота от 1 до 13 % и. Доля этого золота практически не зависит от содержаний кварца, силикатов, сульфатов и карбонатов. Количество свободного золота в рудах определяется температурой кристаллизации и летучестью серы в период образования руд. Ведущим минералом-концентратором золота в рудах является пирит. Концентрации золота в сосуществующих с пиритом теллуридах, сульфосолях выше чем в пирите и на основе привлечения теории фазового соответствия в перспективе позволяют оценить количество изоморфного и субмикроскопического золота связанного с пиритом. (6 табл.).

Ключевые слова: рациональный анализ, золото, колчеданные месторождения, пирит, теллуриды, сульфосоли.

Abstract

Form existing of gold in massive sulfide ore deposits of Gaiskoye, Voroshilovskoye, Safyanovskoye and Blayvinskoye have been studied rational

phase analysis. Relative high part of metallic gold from 18 to 89 percent observed in bornite ore Gaiskoye deposits. Weakly metamorphic massive sulfide ore (Safyanovskoye and Blayvinskoye deposits) show high part gold coupling with sulfide from 45 to 79 percent and relative small part of metallic gold from 1 to 13 percent. This gold are not determined of the content quartz, silicate, sulfate and carbonate. Quantity of metallic gold in ores determine of temperature and fugacity of sulfur vapor in period of ore formation. Pyrite is main mineralogical carry of gold in massive sulfide ore. Date of gold content coexistent with pyrite telluride and complete sulfide allow possible determination the low content admixture of gold in pyrite on basic principle theory phase composition correlation.

Keywords: rational phase analysis, gold, massive sulfide ore deposits, pyrite, telluride, complete sulfide.

Колчеданные месторождения Урала характеризуются наличием значительных по количеству попутных запасов золота. Специфическими особенностями руд колчеданных месторождений являются более низкие по сравнению с золоторудными месторождениями содержания золота. Тем не менее, ввиду значительных объемов руд, запасы золота на этих месторождениях приближаются к запасам средних и даже крупных золоторудных месторождений. Однако извлечение золота из этих руд отстает от уровня золото-сульфидных месторождений, в том числе и из золото-мышьяковистых руд, которые по условиям извлечения золота традиционно считаются упорными (Таусон и др., 1996). Одной из причин отставания уровня извлечения золота из руд колчеданных месторождений на наш взгляд является недостаточная изученность минералогии и геохимии золота в рудах.

Для характеристики золота в продуктах обогащения руд применяются методы рационального анализа, результаты которых показывают, что основную долю золота в рудах колчеданных месторождений, составляет золото, связанное с сульфидами. Считается, что оно находится в виде тонкодисперсных сростков с сульфидами, адсорбированной форме или в виде соединений с ними. С другой стороны данные рационального анализа золота из золоторудных месторождений Урала показывают увеличение доли свободного золота и золота, находящегося в сростках и относительно небольшой доли золота, связанного с сульфидами (Мурзин и др., 1999).

Полученные благодаря использованию локального рентгеноспектрального микроанализа результаты изучения минераль-

ных форм золота показывают, что наряду с самородным золотом в рудах колчеданных месторождений Урала присутствует обширный набор теллуридов, который приближается к золото-сульфидно-кварцевым и золото-полисульфидно-кварцевым месторождениям (Константинов и др., 2000). Наряду с этим, примеси золота отмечаются и в сульфидных минералах сфалерите, галените, блеклых рудах, а также теллуридах свинца, висмута и серебра (Викентьев и др., 2000; Молошаг и др., 2002).

Основной объем рудных тел большинства колчеданных месторождений слагают мелкозернистые руды с содержанием золота в пределах 1 – 2 г/т, в которых крайне редко удается наблюдать минералы золота. Самородное золото и теллуриды доступны для изучения методами рудной микроскопии в образцах относительно богатых золотом медно-цинковых руд (содержание $Au \geq 2$ г/т). Обнаружить видимое золото и теллуриды удается в крупнозернистых разностях этих руд, которые являются результатами метаморфического их преобразования (Ярош, 1973) или воздействия поздних гидротермальных процессов.

Описание минеральных форм золота и связи их с другими минералами требует применения других методов исследования. По сравнению с золоторудными месторождениями специфическими особенностями руд колчеданных месторождений являются относительно мелкие размеры и редкая встречаемость видимых выделений минералов золота, которые не позволяют с достаточной полнотой описать минералогию данного элемента. Экспериментальные исследования условий переноса и отложения металлов в рудообразующих растворах, включая результаты синтеза минералов, при наличии данных о температуре, давлении паров летучих компонентов, кислотности растворов и других параметров условий образования руд, позволяют подойти к решению задачи прогнозирования минеральной формы нахождения золота.

Целью предлагаемой статьи является интерпретация данных рационального анализа золота на основе исследований минеральных парагенезисов и физико-химических условий формирования руд колчеданных месторождений, а также детального изучения химического состава минералов локальными методами анализа.

Методы мессбауэровской и рентгеновской спектроскопии показали, что золото в сульфидах присутствует в виде Au^{3+} , Au^{1+} , Au^{1-} и Au^0 (Cabri et al., 2000; Fleet, Mumin, 1997). Под Au^0 понимается свободное золото (Мурзин и др., 1999; Simon et al., 1999). Один из перспективных методов определения концентрации структурной примеси золота основывается на использовании теории фазового соответствия, исходным положением которой является равновесное распределение примесей в сосуществующих минералах (Таусон и др., 1998, 2001).

Содержание структурной примеси золота в сульфидах находится на основе исследований распределения золота в гриноките CdS - сульфида с высокой концентрацией структурной (изоморфной) примеси золота, составляющей сотые доли мас. %, - и равновесных с ним пирита или других сульфидов. Синтез фаз гринокита и пирита, которые находятся в химическом равновесии друг с другом, проводился при 500 °С и 100 МПа, в присутствии мышьяка и селена. При данных условиях содержание изоморфной примеси золота в гриноките составляет 60 г/т, для пирита соответственно 3 ± 1 г/т. При равновесии гринокита с галенитом в этих же условиях значение концентрации изоморфной примеси золота в галените составило 4.6 ± 1.3 г/т (Таусон и др., 2001).

Непосредственное использование гринокита для определения количества структурной примеси золота в пирите - ведущем концентрате золота в рудах колчеданных месторождений - невозможно ввиду отсутствия данного минерала в гипогенных рудах. Находки гринокита, которые упоминаются в литературе, связаны с развитием процессов экзогенного окисления сфалерита при добыче руд (Иванов О.К., 1990). Содержания примеси кадмия в сфалерите и блеклых рудах, которые концентрируют преобладающую долю цинка в рудах колчеданных месторождений, составляют не более 1.0 мас. % (Викентьев и др., 2000; Мозгова, Цепин, 1983; Молошаг, Викентьев, 2001). Из этих данных, включая выборочные анализы названных минералов (см. табл. 4), следует, что присутствие гринокита в первичных, гипогенных рудах колчеданных месторождений является маловероятным, хотя на отдельных золоторудных месторождений гринокит наблюдается как первичный минерал (Мурзин, 1997).

Исследования Л.В. Таусона с соавторами (2001) ориентиро-

вались в первую очередь на выяснение форм нахождения золота в минералах золото-мышьяковых руд, в которых значительная доля золота в рудах связана с арсенопиритом. В отличие от этих руд арсенопирит в колчеданных месторождениях отмечается в значительно меньших количествах. Тем не менее, теоретические и экспериментальные разработки, достигнутые упомянутыми авторами при исследованиях золото-мышьяковых руд, можно использовать для определения предельных, пороговых концентраций структурной примеси золота в минералах руд колчеданных месторождений.

Одним из путей решения этой задачи для рассматриваемых месторождений заключается в поиске минералов, способных концентрировать достаточно высокие содержания структурной примеси золота, которые являлись бы величиной одного порядка с гринокитом или даже превышали бы их. Таким минералами, на наш взгляд, могут быть теллуриды, а также сульфосоли мышьяка, сурьмы и висмута. Исследования состава данных минералов из руд Сафьяновского, Александринского, Узельгинского и других колчеданных месторождений Урала показали наличие в них значительных значений содержаний примеси золота. К сожалению, целенаправленные экспериментальные исследования количества и форм нахождения примесей золота в теллуридах и сульфосолях, по всей видимости, пока не проводились.

Химические анализы теллуридов свинца, висмута и серебра, которые были получены до внедрения микронзондовых исследований, свидетельствуют о возможности вхождения определенного количества примеси золота, не превышающего десятых долей мас. %. Хотя нельзя исключить наличие включений и сростков минералов золота, эти данные в определенной степени подтвердились анализами, выполненными на микроанализаторах. Исследования фазовых диаграмм типа $M - Te - Au$, где $M - Bi, Pb$ и другие металлы, которые включают составы большинства теллуридов, свидетельствуют о возможности существования в теллуридах твердых растворов золота (Cabri, 1973). Однако для такого компонента с ограниченной растворимостью, как золото, данный метод следует использовать с крайней осторожностью, поскольку построение фазовых диаграмм обычно осуществляется на базе данных нескольких десятков исходных со-

ставов с шагом от 10 до 1 массовых или атомных процентов, которые равномерно покрывают всю диаграмму или выбранные участки.

На сегодняшний день разработаны методики определения примеси золота в сульфидах и теллуридах, составляющей 10^{-2} мас. % для рентгеноспектрального микроанализа (Викентьев и др., 2000) и 10^{-5} мас.% для вторичной ионной масс-спектрометрии (Бортников и др., 2003). Таким образом, по содержанию изоморфной примеси золота в теллуридах на основе использования методов теории фазовых соответствий в перспективе открываются возможности оценки концентрации структурной примеси золота в сульфидах колчеданных руд. В качестве исходных предпосылок мы принимаем, что кристаллизация сульфидов и теллуридов происходила в условиях, близких к равновесным, а содержание золота в теллуридах зависело от концентрации его в минералообразующей среде и условий их кристаллизации.

Концентрация тонкодисперсной примеси золота в сульфидах из руд Гайского месторождения составляет от 1.06 до 2.10 г/т, что значительно меньше пределов изменения общих содержаний золота (см. табл. 1). Содержания (в г/т) такой формы нахождения золота для руд Сафьяновского месторождения практически не отличаются от руд Гайского месторождения, хотя ее относительная доля значительно выше (см. табл. 1). Исходя из данных результатов, можно предположить существование “критических” значений концентрации структурной примеси золота в рудах колчеданных месторождений. В сплошных и особенно вкрапленных рудах практически отсутствует золото, связанное с силикатами и кварцем. Независимо от количества этих минералов основная масса золота связана с сульфидами, что, как было сказано выше, является специфической особенностью руд колчеданных месторождений.

В исследованных нами пробах руд относительная доля тонкодисперсного золота в сульфидах не зависит от химического и минерального состава руд (см. табл. 2,3). То же самое можно сказать о других формах присутствия золота в рудах, которые определяются с помощью рационального анализа. Необходимо подчеркнуть, что самородное золото в рудах колчеданных месторождений наблюдается и при относительно низких значени-

ях валовых его содержаний (пробы Г 501/74, К 14/82, см. таблицы 1 и 5). Очевидно, причиной появления самородного золота является процесс низкотемпературной метаморфической перекристаллизации руд.

Проблемы геохимии и минералогии золота в рудах колчеданных месторождений во многом удалось бы снять путем решения вопросов о формах связи золота с пиритом, как основным минералом руд. Согласно результатам технологических испытаний основная часть золота в процессе обогащения остается в пиритном концентрате и хвостах, содержащих до 95% пирита.

Основной объем руд сложен тонкозернистым пиритом. Для такого пирита из Блявинского месторождения, как впервые было показано П.Я.Ярошем (1973), характерным признаком является незначительный размер блоков микромозаики (~0.1 мкм). При перекристаллизации происходит возрастание размера блоков в 2.5 – 3 раза с появлением крупнозернистых, порфиробластовых выделений. Укрупнение зерен отмечается для всех рудных минералов и сопровождается освобождением их от примесей. Процессы перекристаллизации руд способствовали укрупнению зерен золота путем собирательной перекристаллизации, что проявляется в увеличении доли золота со свободной металлической поверхностью (см. табл. 1) и относительно частой его встречаемости под микроскопом. Данные наблюдения в целом подтверждаются современными исследованиями форм нахождения золота в различных морфологических разновидностях пирита из безборнитовых руд Гайского месторождения (Чантурия, Бочаров, 2001).

Образование борнитсодержащих руд, содержащих самородное золото, происходило при повышенной летучести серы (Викентьев и др., 2002; Молошаг и др., 2002). Такие условия способствовали освобождению пирита от структурно связанного золота. Этот вывод соответствует данным В. Л. Таусона (1999) о вероятной форме нахождения золота в пирите. Он считает, что оно связано с вакансиями серы в кристаллической структуре пирита, которые образуются при росте кристаллов из гидротермальных растворов за счет взаимодействия с компонентами флюидной среды. Известно два вида вакансий: первый связан с замещением дианиона серы S_2^{2-} комплексным анионом AsS_3^{3-} и

второй - заменой S_2^{2-} на HS^- . Золото в виде одновалентного иона Au^+ , как считает упомянутый автор, в том и другом случае замещает ионы двухвалентного железа Fe^{2+} . Повышение давления паров серы во флюиде приводит к восстановлению дианиона серы и золота до Au^0 .

Таблица 1

Формы нахождения золота в рудах колчеданных месторождений Урала по данным рационального анализа (числитель-содержание грамм на тонну; знаменатель- распределение %)

Рудный район, месторождение	Привязка	№ пробы	Тип руд	1	2	3	4	5	6	7
Гайское	Стержневая линза	501 / 74	МЦК	0.5	0.05	0.55	1.4	-	2.5	694
				20.0	2.0	22.0	56.0	-	100	100
		502 / 74.	МК	16.8	0.7	1.6	2.10	-	21.2	356.1
				79.2	3.3	7.5	10.0	-	100	100
	536/78	МЦК	2.8	1.1	2.1	1.9	-	7.9	447.4	
			35.4	13.9	26.6	24.1	-	100	100	
	507 / 77	МК	0.40	0.10	0.60	1.06	-	2.16	191.5	
			18.5	4.6	27.8	49.1	-	100	100	
	Рудное тело № 14	059	МЦК	0.30	0.06	5.4	2.6	-	8.36	97.3
				3.6	0.7	64.6	31.1	-	100	100
		057	МЦК	0.14	0.20	1.30	0.90	-	2.54	36.2
				5.5	7.9	51.2	35.4	-	100	
Рудное тело 15 - 19	0103	МК	0.2	0.01	1.10	1.25	-	2.56	36.8	
			7.8	0.4	43.0	48.8	-	100	100	
Южная линза	0102	МЦК	0.30	0.20	2.30	2.60	-	5.4	61.8	
			5.6	3.7	42.6	48.1	-	100	100	
Карабашский, Ворошиловское	Западная жила, гор. XVII	К 14 / 82	МЦК	0.08	0.15	0.20	0.93	-	1.36	940
				5.9	11.0	14.7	68.4	-	100	100
	Западная жила, гор. XVIII-XIX	К 15 / 82	МЦК	0.30	0.40	1.10	1.60	-	3.4	52.5
				8.8	11.8	32.4	47.0	-	100	100
	К 16 / 82	МЦК	0.2	0.4	0.9	2.9	-	4.4	66.0	
			4.5	9.0	20.6	65.9	-	100	100	
Сафьяновское	Рудное тело № 1	С -1	МК	0.01	0.01	0.19	0.80	-	1.01	
				0.9	0.9	18.8	79.4	-	100	
	С-2	МЦК	0.01	0.02	0.17	1.32	-	1.52		
			0.6	1.3	11.2	86.9	-	100		
	С-2064/ 37.9-39.3	МК	0.02	0.01	0.10	0.80	Н. о.	0.93		
			2.2	1.1	10.7	86.0	-	100		

Рудный район, месторождение	Привязка	№ пробы	Тип руд	1	2	3	4	5	6	7
Сафьяновское	Рудное тело № 1	С 2064/94.4–100.6	МЦК	0.03	0.02	0.03	1.60	0.15	1.83	
				1.6	1.1	1.6	87.4	8.3	100	
	С 2066/123.6–125.3	МВ	Н. о.	0.01	0.02	0.16	Н. о.	0.19		
			-	5.3	10.5	84.2	-	100		
Медногорский, Блявинское	Рудное тело № 1	С 1/30	МВ	0.02	0.01	0.08	0.09	-	0.20	8.8
				10.0	5.0	40.0	45.0	-	100	100
	С 2/7	МВ	0.04	0.01	0.07	0.17	-	0.29	12.1	
			13.8	3.4	24.2	58.6	-	100	100	
	С 1/34	МВ	0.01	0.02	0.08	0.20	-	0.31	7.7	
			3.2	6.4	25.8	64.6	-	100	100	

Рациональный анализ проб руд выполнен в пробирной лаборатории Института «Унипромедь». Аналитик Олексеук.

Обозначения: 1 – свободное золото, с чистой металлической поверхностью; 2 – свободное золото с пленками гидроокислов и карбонатов; 3 - золото в сростках с силикатами и сульфидами; 4 – золото тонкодисперсное в сульфидах; 5 - золото химически связанное с силикатами; 6 – общее содержание золота в пробе; 7 - общее содержание серебра в пробе.

МК – сплошная медноколчеданная руда; МЦК – сплошная медноцинковая колчеданная руда; МВ – медная руда прожилкововкрапленная;

Примечание: К 14/82 - гнезда сульфидов в кварц-серицитовом сланце, представленных пиритом, борнитом, баритом со сфалеритом, дигенитом; К 15/82 – руда представлена пиритом, халькопиритом, сфалеритом с магнетитом, арсенопиритом; К 16/82 – сульфиды представлены пиритом, сфалеритом, халькопиритом с арсенопиритом, теннантитом, галенитом. Пробы 0102 и 0103 аналогичны пробам 057 и 059. Состав остальных проб приведен в таблице 3.

Химический состав золотосодержащих руд колчеданных месторождений

Пробы	М-ния		Гайское			
	502/74	501/74	536/78	507/77	057	059
Содержание, мас. %						
Cu	26.24	25.84	33.24	16.38	9.96	9.43
Zn	0.43	19.06	4.25	1.08	4.41	10.67
Pb	0.64	0.12	0.35	0.25	0.04	0.42
S	32.17	33.00	24.83	27.28	41.08	37.73
As	0.118	0.106	0.26	1.56	0.068	0.19
Ba	1.24	<0.10	6.22	2.89	<0.10	<0.10
SiO ₂	9.08	2.92	6.66	24.82	5.75	7.08
Al ₂ O ₃	1.89	0.45	0.62	0.89	0.47	1.89
Fe _{total}	25.35	15.98	15.51	21.47	34.11	29.21
K ₂ O	0.19	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10	0.21
Na ₂ O	0.12	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10	0.17
CaO	0.44	<0.30	<0.30	<0.30	0.72	0.63
MgO	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30
P ₂ O ₅	0.17	0.14	0.28	1.07	0.10	0.20
CO ₂	0.35	<0.10	<0.10	<0.10	0.14	0.29
Содержание, г/т						
Sb	<50	900	450	210		200
Ge	16.0	63.6	6.8	81.0	4.3	7.9
Hg	12	148	58	64	34	78
Cd						
Se	13.0	<5.0	6.0	14.0	25.0	43.0
Te	93.0	21.0	120.0	210.0	56.0	110.0
Ga	12.3	178.0	26.6	14.3	12.3	41.6
In	30.3	76.5	43.6	36.8	11.5	11.5
Mo	140	30	40	120	60	120
Au	21.20	2.50	7.90	2.16	2.54	8.36
Ag	356.1	694.0	447.4	191.5	36.2	97.3

Примечание.

Анализы руд Гайского и Блявинского месторождений выполнены в Полевой лаборатории ПГО «Уралгеология», аналитик Шор Р.М.; Сафьяновского месторождения в Центральной лаборатории ПГО «Уралгеология».

М-ния Пробы	Блявинское			Сафьяновское	
	1/30	1/34	2/7	МК	МЦК
Содержание, мас. %					
Cu	0.58	1.03	2.30	1.55	0.89
Zn	0.09	0.17	0.10	0.34	3.07
Pb	0.02	0.01	0.03	0.14	0.09
S	27.94	21.64	34.45	43.00	40.00
As		0.035		0.26	0.25
Ba	<0.10	<0.10	<0.10	0.073	0.905
SiO ₂	40.90	52.06	29.77	12.90	13.08
Al ₂ O ₃	0.61	0.33	0.44	1.83	1.63
Fe _{total}	26.16	21.37	29.74	37.63	36.81
K ₂ O	≤0.10	≤0.10	≤0.10		
Na ₂ O	≤0.10	≤0.10	≤0.10		
CaO	<0.30	0.75	<0.30	0.85	1.31
MgO	<0.30	<0.30	<0.30	0.36	0.33
P ₂ O ₅	0.05	0.07	≤0.05	<0.05	<0.05
CO ₂	0.17	<0.10	≤0.10		
Содержание, г/т					
Sb	<50	<50	<50	240	210
Ge	<2.0	≤2.0	≤2.0	1.34	1.73
Hg	3	4	6	12	40
Cd				26	21
Se	83.0	60.0	24.0	90.9	37.5
Te	22.0	8.0	20.0	24.6	17.0
Ga	≤2.0	3.0	2.4	5.1	8.4
In	<2.0	<2.0	≤2.0	3.2	1.7
Mo	<30	<30	<30	32	30
Au	0.20	0.31	0.29	1.01	1.52
Ag	8.8	7.7	12.1	40.98	70.10

Анализы сульфидов, теллуридов и сульфосолей из золотосодержащих руд колчеданных месторождений показывают наличие примеси золота в этих минералах (см. табл. 4). Образцы борнитов Гайского месторождения (№ 0753 и 0754), в которых исследовались содержания золота, отбирались из Стержневой линзы, и по минеральному составу они соответствуют пробам № 502/74, 507/77 и 536/78, для которых выполнялся рациональный анализ золота. Полученные результаты не исключают, что наряду со структурно связанным золотом в исследованных нами минералах оно может находиться в виде тонкодисперсных, суб-микроскопических включений и сростков.

Соотношения минералов в пробах золотосодержащих руд

М-ния	Пробы	Содержание, мас. %											
		Py	Bn	Sp	Fz	Ga	Dg	Q	Ser	Ba	Carb	Ap	
Гайское	502	24.0	32.1	24.1	0.6	4.9	0.74	Н.о	7.1	4.5	2.1	0.4	0.4
	501	31.8	34.0	-	28.7	0.81	0.16	3.8	2.4	1.2	-	0.3	
	536	22.7	28.8	21.0	6.1	1.30	0.40	Н.о	4.5	1.8	10.6		0.7
	507/77	36.3	11.0	17.3	0.8	7.4	0.30	Н.о	23.5	1.8	3.3		2.6
	057	53.0		28.3	6.5	0.4	-		5.2	1.2		0.4	0.2
	059	42.6		26.0	16.2	1.1	0.5		4.9	5.0		0.8	0.5
Блявинское	С 1/30	51.0		1.8	0.13	-	-		40.2	1.0	-	0.2	-
	С 1/34	37.1		3.0	0.25	0.1	-		51.7	0.5	-	1.5	-
	С 2/7	58.4		6.6	0.15	-	-		29.1	0.7	-	-	-
Сафьяновское	МК	72.2		3.97	0.45	0.5	-		10.8	4.7	0.12	6.1	
	МЦК	66.5		1.88	4.5	0.5	0.10		11.3	4.2	1.54	4.5	

Обозначения: Py – пирит; Bn - борнит; Sp - халькопирит; Sp - сфалерит; Fz – блеклая руда; Ga – галенит; Dg - дигенит; Q - кварц; Ser - серицит; Ba - барит; Carb – карбонат; Ap - апатит.

Таблица 4

Электрум-сфалеритовая термометрия золотосодержащих борнитовых руд Гайского месторождения

Проба	501 / 74	502 / 74-1	502 / 74-2	502 / 74-3
N _{Ag}	0.2449	0.1624	0.2059	0.2285
X _{FeS}	0.0010	0.0020	0.0020	0.0020
T °C	280	364	330	316
Log f _{S2}	-7.2	-4.3	-5.6	-6.2

Продолжение таблицы 4

Проба	536 / 78-1	536 / 78-2	536 / 78-3	507 / 77
N _{Ag}	0.2441	0.2481	0.1986	0.2705
X _{FeS}	0.0009	0.0009	0.0009	0.0012
T °C	278	276	306	272
Log f _{S2}	-7.2	-7.4	-6.0	-7.8

Таблица 5

Анализы золотосодержащих минералов

Образец	I-754-3				I-754/1			424/78	
	Вп								Py
As	0.00	0.06	0.11	0.07	0.09	0.00	0.00	0.03	0.00
S	26.19	25.96	26.66	26.20	25.99	26.01	26.30	53.85	0.00
Cu	62.68	62.58	61.33	61.95	62.24	61.27	60.97	0.04	0.07
Se	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.25
Sb	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.06
Fe	10.50	10.45	11.16	11.25	11.08	11.83	11.33	45.42	0.70
Ag	0.48	0.41	0.26	0.35	0.16	0.41	0.54	0.05	0.05
Zn	0.03	0.00	0.02	0.00	0.14	0.14	0.10	0.14	0.03
Te	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.19
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.21	0.00
Pd	0.00	0.07	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.07	0.03
Pt	0.16	0.00	0.00	0.11	0.00	0.03	0.00	0.12	0.05
Pb	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.17	0.06	0.00	61.69
Sn			0.03	0.00	0.00	0.03	0.04		
In			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Au	0.11	0.10	0.10	0.07	0.06	0.00	0.07	0.10	0.12
Bi	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
Sum	100.26	99.65	99.76	100.00	99.88	99.94	99.55	100.03	100.24

Продолжение таблицы 5

Образец	418/78				IV-C2149/126.0				
	Alt				Sf	Hs	Wt	Ak	
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.02	0.00	0.00	0.03	4.30	4.20	0.00	18.87	17.14
Cu	0.00	0.02	0.00	0.39	0.11	0.23	0.15	32.15	11.20
Se	0.14	0.08	0.08	0.10	0.98	1.07	0.05	1.02	0.44
Sb	0.20	0.27	0.23	0.18	0.14	0.15	0.21	0.09	0.00
Fe	0.55	0.00	0.00	0.26	0.07	0.11	0.05	0.45	0.11
Ag	0.08	0.18	0.05	0.05	0.03	0.02	60.89	1.78	0.00
Zn	0.01	0.04	0.06	0.04	0.00	0.00	0.02	2.13	0.00
Te	35.44	37.95	38.03	37.27	36.04	36.25	37.33	0.27	0.00
Hg	0.10	0.14	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
Pd	0.08	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07
Pt	0.25	0.00	0.00	0.11	0.08	0.02	0.14	0.15	0.00
Pb	60.43	61.23	61.49	61.49	0.00	0.00	0.09	0.70	36.79
Sn									
In									
Au	0.12	0.15	0.04	0.00	0.14	0.02	0.16	0.00	0.05
Bi	0.00	0.00	0.00	0.00	58.05	57.92	0.00	41.99	32.58
Sum	97.42	100.20	100.22	99.92	99.94	99.99	99.09	99.86	98.38

В приведенных таблицах римскими цифрами обозначены месторождения: I - Гайское; II – Барсучий лог; III – месторождение им. III Интернационала; IV - Сафьяновское; V - Узельгинское.

Продолжение примечания к таблице 5.

Сокращения: Alt - алтаит; Ak - айкинит; Вп - борнит; Ср - халькопирит; Ga - галенит; Hs - гессит; Py - пирит; Sf – сульфотеллурид состава Bi_3Te_3S ; Td - тетраэдрит; Tn – теннантит; Wt – виттихенит.

Пропуски в таблицах обозначают, что концентрации элементов не измерялись. Анализы проводились на микроанализаторе SX-50. Институт ИГЕМ РАН, аналитик - А.И.Цепин.

Таблица 6

Встречаемость самородного золота в пробах золотосодержащих руд колчеданных месторождений

М-ние	Гайское						Карабашское		
	501/74	502/74	536/78	507/77	059	057	К 14/82	К 15/82	К 16/82
Проба									
Общее число полировок	328	116	118	129	15	13	18	19	24
Из них с Au самородным	44	6	11	5	1	0	1	0	1
М-ние	Блявинское				Сафьяновское				
	1/30	2/7	1/34	C-1	C-2	C-2064/37.9-39.3	C 2064/94.4-100.6	C 2066/123.6-125.3	
Проба									
Общее число полировок	6	15	10	10	10	7	6	16	
Из них с Au самородным	0	0	0	0	0	1	1	0	

В борнитсодержащих руд колчеданных месторождений, где наблюдается развитие гипогенного дигенита, мы надеялись обнаружить сульфиды золота, поскольку экспериментальные исследования показали, что соответствующие условиям их образования значения температуры и летучести серы частично перекрываются с полем устойчивости дигенита (Некрасов, 1991; Barton, 1980; Barton et al., 1978). Несмотря на значительные содержания серебра в образцах борнитовых руд из Стержневой линзы Гайского месторождения (см. табл. 1) сульфиды золота в них не были обнаружены, что подтверждается высокими значениями доли золота со свободной металлической поверхностью и частыми находками самородного золота (см. табл. 1, 6). Диге-

нит в рудах месторождений им. III Интернационала (Сан-Донато) и Карабашского сопровождается сульфидами серебра: штрмейеритом, маккинстритом и джалпаитом (Молошаг и др., 1995). Нами исследована одна из таких проб К 14/82. В этой пробе тоже не удалось обнаружить сульфиды золота, хотя она и отличается незначительной долей свободного золота. Мы предполагаем, что их отсутствие может быть связано с частичным вхождением золота в виде изоморфной примеси в штрмейерит и другие сульфиды меди и серебра. Не смотря на отсутствие сульфидов золота в изученных образцах руд, возможность их обнаружения в принципе не исключена.

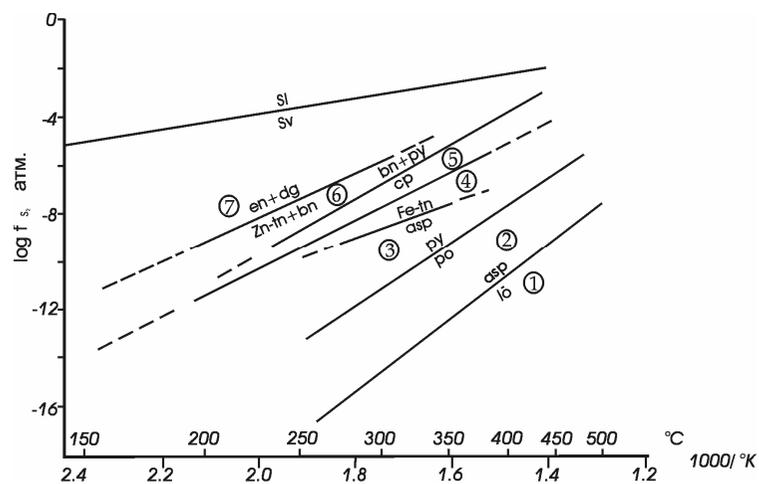


Рис. 1. Диаграмма летучесть серы – температура реакций сульфидизации минералов, определяющих парагенетические ассоциации сульфидов колчеданных и медно-золото-порфировых месторождений.

Ассоциации: 1 – лёллингит-пирротиновая; 2 – арсенопирит-пирротиновая; 3 – арсенопирит-халькопиритовая; 4 – халькопирит-блеклорудная; 5 – энаргит-халькопиритовая; 6 – борнит-блеклорудная; 7 – энаргит-дигенитовая.

Обозначения: py – пирит; ро – пирротин; cp – халькопирит; bn – борнит; lö – лёллингит; asp – арсенопирит; Fe-tn – железистый теннантит; Zn-tn – цинковистый теннантит; en – энаргит; dg – дигенит; S_l – сера жидкая; S_v – сера газообразная.

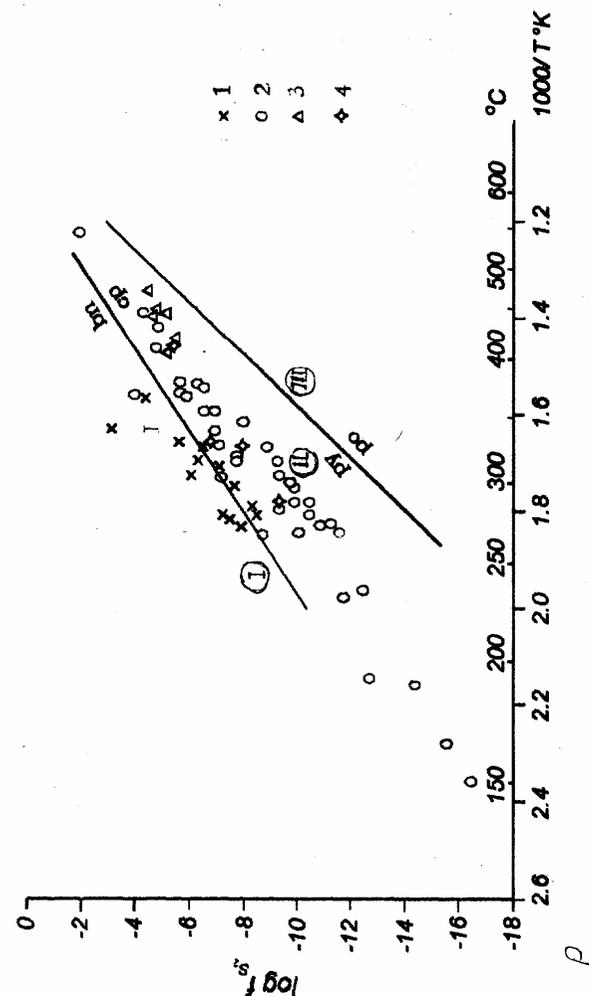


Рис. 2. Диаграмма результатов электрум-сфалеритовой термометрии руд колчеданных (1,2) и медно-золото-порфировых (3,4) месторождений. Ассоциации (субфации): I – борнит-блеклорудная; 2, 4 – халькопирит-блеклорудная; 3 – арсенопирит-халькопиритовая. Римскими цифрами обозначены фации метаморфизма руд: I – борнитовая; II – халькопиритовая; I – пирротиновая.

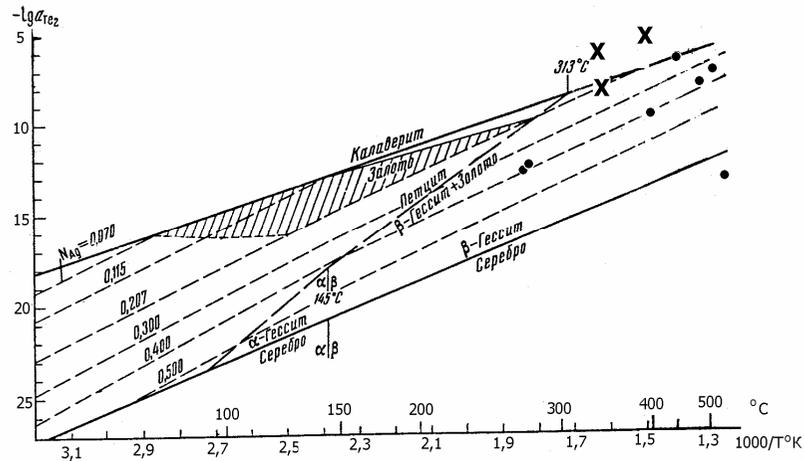


Рис. 3. $\log f_{Te_2} - 1/T$ диаграмма стабильности Au-Ag-Te минералов. Область, соответствующая вероятным условиям отложения золото-теллурических руд месторождения Флоренсия, выделена штриховкой (по Бортникову и др., 1988). Точки обозначают значения $\log f_{Te_2}$ руд колчеданных месторождений; крестики - медно-золото-порфировые руд.

Выводы

Для руд колчеданных месторождений наиболее информативными показателями их генезиса, которые можно получить с помощью рационального анализа, являются количество свободного золота и концентрация золота, связанного с сульфидами. В общем, доля свободного золота увеличивается в борнитовых рудах по сравнению с безборнитовыми, что соответствует условиям повышенной летучести серы при их формировании. Примеси золота в теллуридах и сульфосолях в перспективе можно использовать для определения концентрации структурной примеси золота в минералах руд колчеданных месторождений на основе минералогической термометрии и разработок теории фазового соответствия.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 01-05-64510).

1. Бортников Н.С., Кабри Л., Викентьев И.В., Тагиров Б.Р., Мак Мэйхон Г., Богданов Ю.А. Невидимое золото в сульфидах из современных колчеданных построек: К вопросу о поведении золота в субмаринных гидротермальных системах // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 385. №2.

2. Викентьев И.В., Беленькая Ю.А., Агеев Б.И. Александринское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. № 3. С. 248–274.

3. Викентьев И.В., Молошаг В.П., Юдовская М.А., Еремин Н.И. Платиноиды в рудах колчеданных месторождений Урала // Доклады Академии наук. 2002. Т. 384. №6. С. 785–789.

4. Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 576 с.

5. Иванов О.К. Гринокит // Минералогия Урала. Элементы. Карбиды. Сульфиды. УрО РАН. 1990. с.337.

6. Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Научный мир, 2000. 272 с.

7. Мозгова Н.Н., Цепин А.И. Блеклые руды. М.: Наука, 1983. 280 с.

8. Молошаг В.П., Колотов С.В., Гуляева Т.Я. Новые данные о сульфидах меди и серебра в колчеданных месторождениях Урала // Уральский минералогический сборник. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. № 5. С. 223–231.

9. Молошаг В.П., Викентьев И.В. Распределение платиноидов и золота в минералах колчеданных месторождений Урала // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2001. С. 161–166.

10. Молошаг В.П., Грабежев А.И., Гуляева Т.Я. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфирических месторождений Урала // Зап. ВМО. 2002. Ч. 131. № 5. С. 40–54.

11. Мурзин В.В. Редкие рудные минералы Приозерного золото-кварцевого месторождения (Северный Урал) // Уральский минералогический сборник. Миасс: ИМин УрО РАН, 1997. № 7. С. 83–89.

12. Мурзин В.В., Семенкин В.Н., Сазонов В.Н., Бортников Н.С., Столяров М.И. Соотношение форм золота в рудах некоторых месторождений Урала по данным фазового анализа // Ежегодник-1999. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2000. С. 255–260.

13. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 304 с.

14. Таусон В.Л., Миронов А.Г., Смагунов Н.В., Бугаева Н.Г., Акимов В.В. Золото в сульфидах: состояние проблемы форм нахождения и перспективы экспериментальных исследований // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 3. С. 3–14.

15. Таусон В.Л. Эндокрипция: современное содержание понятия и методы исследования // Геохимия. 1999. № 6. С. 665–668.

16. Таусон В.Л., Салихов А., Матшулат Й., Смагунов Н.В., Бессарабова О.И., Меньшиков В.И., Пархоменко И.Ю. О возможности аналитического определения структурной составляющей примеси золота в сульфидных минералах // Геохимия. 2001. № 9. С. 951–960.

17. Чантурия Е.Л., Бочаров В.А. Изучение природы и технологических свойств золота в сульфидных медно-цинковых рудах Гайского месторождения // Цветные металлы. 2001. № 6. С. 61–65.

18. Ярош П.Я. Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале. М.: Наука, 1973. 237 с.

19. Barton M.D. The Ag – Au – S system // Econ. Geol. 1980. V. 75. No 2. P. 303–316.

20. Barton M.D., Kieft C., Burke E.A.J., Oen I.S. Uyttenbogardite, a new silver-gold sulfide // Canad. Miner. 1978. V. 16. No 4. P. 651-657.

21. Cabri L.J. Phase relations in the Ag – Au – Te systems and their mineralogical significance // Econ. Geol. 1965. v.60. No 8. P. 1569– 606.

22. Cabri L.J., Newville M., Cordon R.A., Crozier E. D., Sutton S. R., McMahon G., Jiang D-T. Chemical speciation of gold in arsenopyrite// Canad. Miner. 2000. V. 38. P. 1265-1281.

23. Fleet M., Mumin A.H. Gold-bearing arsenian pyrite and marcasite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis // Amer. Mineralogist. 1997, V.82. P.182-193.

24. Simon G., Kesler S.E., Chryssoulis S. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: implications for deposition of gold in Carlin-type deposits// Econ. Geol. 1999, V.94, P.405-422.