

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЗОЛОТА В РУДАХ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА

В.П. Молошаг, И.В. Викентьев

Колчеданные месторождения Урала характеризуются наличием значительных по объему попутных запасов золота. Специфическими особенностями руд колчеданных месторождений являются более низкие содержания золота по сравнению с золоторудными. 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., 2000].

Результаты изучения минеральных форм золота на колчеданных месторождениях Урала, полученные благодаря использованию локального рентгеновского микроанализа, показывают, что, наряду с самородным золотом, в рудах существует 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 в теллуридах свинца, висмута и серебра [Викентьев и др., 2000; Молошаг и др. 2002].

Самородное золото и теллуриды доступны для изучения методами рудной микроскопии в образцах относительно богатых золотом медно-цинковых руд (содержание ~ 2 г/т). Обнаружить видимое золото и теллуриды удастся в крупнозернистых разностях этих руд, которые являются результатом метаморфическими их преобразований [Ярош, 1973]. Основной объем рудных тел составляют мелкозернистые руды с содержанием золота в пределах $1 - 2$ г/т, в которых крайне редко удастся наблюдать минералы золота.

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 нахождения минералов золота и их состава.

Целью предлагаемой статьи является интерпретация данных рационального анализа золота на основе исследований химического состава минералов, их количества и физико-химических условий формирования руд колчеданных месторождений.

Методы мессбауэровской и рентгеновской спектроскопии показали, что золото в сульфидах присутствует в виде Au^{3+} , Au^{1+} и Au^0 . Под Au^0 понимается свободное золото. [Мур-

зин и др., 2000]. 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. 2001, 1998].

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

Непосредственное использование гринокита для определения количества структурной примеси золота в пирите, как 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 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 $1.0\text{ мас. \%}$ [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 месторождениях гринокит наблюдается как первичный минерал [Мурзин, 1997].

Исследования Л.В. Таусона с соавторами [2001] ориентировались 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 зна-

чительно меньших количествах. Тем не менее, теоретические и экспериментальные разработки, выполненные упомянутыми авторами при исследованиях золото-мышьяковых руд, можно использовать для определения предельных, пороговых концентраций структурной примеси золота в минералах руд колчеданных месторождений.

Один 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 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 микрозондовых 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 $\text{M} - \text{Te} - \text{Au}$, где $\text{M} - \text{Bi}, \text{Pb}$ 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 составов 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 $10^{-2}\text{ мас. \%}$ [Ви-

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

Рудный район, м-ние	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
	Рудное тело № 14	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
		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	
Карабашский, Южное	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
	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
Сафьяновское	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
		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	
Блявинское	Рудное тело № 1	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	
		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	
		С2066/123.6- 125.3	МВ	Н. о.	0.01	0.02	0.16	Н. о.	0.19	
				-	5.3	10.5	84.2	-	100	
		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
	Рудное тело № 1	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

Примечание. 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 медно-цинковая колчеданная руда; МВ – медная руда прожилково-вкрапленная; Пробы: К 14/82 – гнезда сульфидов в кварц-серицитовом сланце, представленные 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. Рациональный анализ проб руд выполнен в пробирной лаборатории Института «Унипромедь». Аналитик Олексеюк.

Химический состав золотосодержащих руд колчеданных месторождений

М-ния	Гайское						Блявинское			Сафьяновское	
Пробы	502/74	501/74	536/78	507/77	057	059	1/30	1/34	2/7	МК	МЦК
Содержание, мас. %											
Cu	26.24	25.84	33.24	16.38	9.96	9.43	0.58	1.03	2.30	1.55	0.89
Zn	0.43	19.06	4.25	1.08	4.41	10.67	0.09	0.17	0.10	0.34	3.07
Pb	0.64	0.12	0.35	0.25	0.04	0.42	0.02	0.01	0.03	0.14	0.09
S	32.17	33.00	24.83	27.28	41.08	37.73	27.94	21.64	34.45	43.00	40.00
As	0.118	0.106	0.26	1.56	0.068	0.19		0.035		0.26	0.25
Ba	1.24	<0.10	6.22	2.89	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.073	0.905
SiO ₂	9.08	2.92	6.66	24.82	5.75	7.08	40.90	52.06	29.77	12.90	13.08
Al ₂ O ₃	1.89	0.45	0.62	0.89	0.47	1.89	0.61	0.33	0.44	1.83	1.63
Fe _{total}	25.35	15.98	15.51	21.47	34.11	29.21	26.16	21.37	29.74	37.63	36.81
K ₂ O	0.19	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10	0.21	≤0.10	≤0.10	≤0.10		
Na ₂ O	0.12	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10	0.17	≤0.10	≤0.10	≤0.10		
CaO	0.44	<0.30	<0.30	<0.30	0.72	0.63	<0.30	0.75	<0.30	0.85	1.31
MgO	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	0.36	0.33
P ₂ O ₅	0.17	0.14	0.28	1.07	0.10	0.20	0.05	0.07	≤0.05	<0.05	<0.05
CO ₂	0.35	<0.10	<0.10	<0.10	0.14	0.29	0.17	<0.10	≤0.10		
Содержание, г/т											
Sb	<50	900	450	210		200	<50	<50	<50	240	210
Ge	16.0	63.6	6.8	81.0	4.3	7.9	<2.0	≤2.0	≤2.0	1.34	1.73
Hg	12	148	58	64	34	78	3	4	6	12	40
Cd										26	21
Se	13.0	<5.0	6.0	14.0	25.0	43.0	83.0	60.0	24.0	90.9	37.5
Te	93.0	21.0	120.0	210.0	56.0	110.0	22.0	8.0	20.0	24.6	17.0
Ga	12.3	178.0	26.6	14.3	12.3	41.6	≤2.0	3.0	2.4	5.1	8.4
In	30.3	76.5	43.6	36.8	11.5	11.5	<2.0	<2.0	≤2.0	3.2	1.7
Mo	140	30	40	120	60	120	<30	<30	<30	32	30
Au	21.20	2.50	7.90	2.16	2.54	8.36	0.20	0.31	0.29	1.01	1.52
Ag	356.1	694.0	447.4	191.5	36.2	97.3	8.8	7.7	12.1	40.98	70.10

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

кентьев и др., 2000]. 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, содержание золота в теллуридах зависит 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 значитель-

но меньше пределов изменения общих содержания 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 сделать предположение о существовании «критических» значений концентраций структурной примеси золота в рудах колчеданных месторождений. В сплошных, и особенно вкрапленных, рудах практически отсутствует золото связанное с силикатами и кварцем. Независимо от их количества основная масса золота связана с сульфидами, что, как было сказано выше, явля-

Соотношения минералов в пробах золотосодержащих руд

М-ния	Пробы	Содержание, мас. %											
		Pu	Bn	Cr	Sp	Fz	Ga	Dg	Q	Ser	Ba	Carb	Ap
Гайское	502	24.0	32.1	24.1	0.6	4.9	0.74	H.o	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	H.o	4.5	1.8	10.6	-	0.7
	507/77	36.3	11.0	17.3	0.8	7.4	0.30	H.o	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	-

Примечание. Pu – пирит; Bn – борнит; Cr – халькопирит; Sp – сфалерит; Fz – блеклая руда; Ga – галенит; Dg – дигенит; Q – кварц; Ser – серицит; Ba – барит; Carb – карбонат; Ap – апатит.

ется 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.

Самородное золото в рудах колчеданных месторождений наблюдается и при относительно низких значениях валовых его содержаний в рудах (пробы Г 501/74, К 14/82), что показано в таблицах 1 и 5. Причиной этому является завершенность процессов метаморфической перекристаллизации руд.

Проблемы геохимии и минералогии золота в рудах колчеданных месторождений во многом удалось бы снять при решении вопросов о формах связи золота с пиритом, как основным минералом руд. О том, что такая связь объективно существует, говорят результаты технологических исследований на стадии разведки месторождений и практика извлечения золота из руд. Согласно этим данным основная часть золота в процессах обогащения остается в пиритном концентрате.

Основной объем рудных тел сложен тонкозернистым пиритом, который при микроскопических исследованиях обнаруживается в появлении структур, свидетельствующих о его кристаллизации из коллоидных агрегатов, ана-

логичных сульфидной составляющей отложенный гидротермальных полей на дне современных океанов. Для такого тонкозернистого пирита из Блявинского месторождения, как впервые было показано П.Я.Ярошем [1973], характерным признаком является незначительный размер блоков микромозаики ($\sim 1 \cdot 10^{-5}$ см). При перекристаллизации происходит возрастание размера блоков (в 2.5 – 3 раза), которое сопровождается появлением крупнозернистых, порфириобластовых выделений.

Укрупнение зерен отмечается для всех рудных минералов и сопровождается освобождением их от примесей. Процессы перекристаллизации руд способствовали также укрупнению зерен теллуридов, сульфосолей и других минералов, которые содержат примеси золота. Эти процессы 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 повышенном давлении (летучести) паров серы [Молошаг и др., 2002]. Такие условия способ-

Таблица 4

Анализы золотосодержащих минералов (мас.%)

Образец	I-754-3						I-754/1		424/78	
Минерал	Bn								Pu	Alt
As	0.00	0.06	0.11	0.07	0.09	0.00	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	0.00
Cu	62.68	62.58	61.33	61.95	62.24	61.27	60.97	0.04	0.07	0.07
Se	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.25	0.25
Sb	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.06	0.06
Fe	10.50	10.45	11.16	11.25	11.08	11.83	11.33	45.42	0.70	0.70
Ag	0.48	0.41	0.26	0.35	0.16	0.41	0.54	0.05	0.05	0.05
Zn	0.03	0.00	0.02	0.00	0.14	0.14	0.10	0.14	0.03	0.03
Tc	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.19	37.19
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00
Pd	0.00	0.07	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.07	0.03	0.03
Pt	0.16	0.00	0.00	0.11	0.00	0.03	0.00	0.12	0.05	0.05
Pb	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.17	0.06	0.00	61.69	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	0.12
Bi	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
Sum	100.26	99.65	99.76	100.00	99.88	99.94	99.55	100.03	100.24	100.24

Таблица 4 (окончание)

Образец	418/78				IV-C2149/126.0				
Минерал	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
Tc	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

Примечание. В приведенных таблицах римскими цифрами обозначены месторождения: I – Гайское; II – Барсучий лог; III – месторождение им. III Интернационала; IV – Сафьяновское; V – Узельгинское. Сокращения: Alt – алтаит; Ak – айкинит; Bn – борнит; Cr – халькопирит; Ga – галенит; Hs – гессит; Pu – пирит; Sf – сульфотеллурид состава $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}_3$; 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

Встречаемость самородного золота в пробах золотосодержащих руд колчеданных месторождений

М-ние	Гайское						Карабашское		
Проба	501/74	502/74	536/78	507/77	059	057	К 14/82	К 15/82	К 16/82
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					
Проба	1/30	2/7	1/34	С-1	С-2	С-2064/3 7.9-39.3	С-2064/ 94.4-100.6	С-2066/ 123.6-125.3	
Общее число полировок	6	15	10	10	10	7	6	16	
Из них с Au самородным	0	0	0	0	0	1	1	0	

ствовали освобождению пирита от структурно связанного с ним золота. Золото в пирите, как считает В. Л. Таусон [1999], связано с вакансиями серы в его кристаллической структуре, которые образуются при росте кристаллов пирита 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 дианионов серы и золота до Au^0 .

Анализы сульфидов, теллуридов и сульфосолой из золотосодержащих руд колчеданных месторождений показывают наличие примеси золота в этих минералах (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 за №№ 502/74, 507/77 и 536/78, для которых выполнялся рациональный анализ золота. Специальных исследований по определению формы наличия золота в сульфидах с применением мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской спектрокопии нами не проводилось. В связи с этим мы полагаем, что наряду со струк-

турно связанным золотом в исследованных нами минералах оно может находиться в виде тонкодисперсных, субмикроскопических включений и сростков.

В борнитсодержащих рудах 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 дигенитом [Некрасов, 1991; Barton, 1980; Barton et al., 1978]. Несмотря на значительные содержания серебра в образцах борнитовых руд из Стержневой линзы (см. табл. 1) сульфиды золота в них не были обнаружены, что подтверждается высокими значениями доли золота со свободной металлической поверхностью и частыми находках самородного золота (см. табл. 1, 6). Дигенит в образцах руд месторождений им. III Интернационала 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, кото-

рые нами в этом отношении не исследовались. Данные результаты объясняют только отсутствие сульфидов золота в конкретных образцах руд, но не исключают возможности их обнаружения на других месторождениях.

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. Вобщем, доля свободного золота увеличивается в борнитовых рудах и уменьшается в безборнитовых рудах. 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).

Список литературы

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.

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

Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А. и др. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Научный мир, 2000. 272 С.

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

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

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

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.

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

Мурзин В.В., Семенкин В.Н., Сазонов В.Н. и др. Соотношение форм золота в рудах некоторых месторождений Урала по данным фазового анализа // Ежегодник-1999. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000. С. 255-260.

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

Тасун В.Л. Эндокрипция: современное содержание понятия и методы исследования // Геохимия. 1999. № 6. С. 665-668.

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

Тасун В.Л., Салихов А., Матшулла И. и др. О возможности аналитического определения структурной составляющей примеси золота в сульфидных минералах // Геохимия. 2001. № 9. С. 951-960.

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.

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

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

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.

Cabri L.J. Phase relations in the Ag - Au - Te systems and their mineralogical significance // Econ. Geol. 1965. V. 60. No 8. P. 1569-1606.