

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕЛЛУРИДОВ В КОЛЧЕДАНЫХ РУДАХ УРАЛА

В. П. Молошаг

Колчеданные месторождения Урала характеризуются разнообразным набором теллуридов. Рудные тела колчеданных месторождений или их отдельные фрагменты, в которых встречаются теллуриды, характеризуются повышенными содержаниями золота и серебра. Выделяются три генетические группы формирования теллуридной минерализации. Первая из них представлена, впервые открытыми, реликтами сульфидных труб древних, палеозойских “черных курильщиков” [3]. Вторая, наиболее распространенная, связана с процессами регионального метаморфизма на уровне зеленосланцевой и пренит-пумпеллиитовой фаций. Последняя выделена как продукт частичного плавления, анатексиса сульфидных руд, подвергнутых контактовому и региональному метаморфизму [1, 8, 9, 11].

Находки теллуридов в сульфидных трубах древних палеозойских “черных курильщиков” связаны с наличием колчеданных руд, которые, пройдя стадию литификации и диагенеза, в последующем практически не подвергались метаморфическим преобразованиям. Основная часть ископаемых труб обнаружена на месторождениях Медногорского района, а также среди сплошных сульфидных руд Александринского и Сафьяновского месторождений [3]. Они содержат богатый набор теллуридов, голдфиллит, реже самородные золото и теллур. Современные черные курильщики образуются в условиях смешивания горячих гидротермальных растворов с холодными относительно богатыми кислородом придонными водами, что не способ-

ствует переходу теллура в восстановленные формы Te^{2+} в теллуридах и самородного теллура Te^0 . Теллуриды в современных сульфидных постройках практически отсутствуют [2]. Как будет сказано ниже, теллуриды и сульфосоли связаны обратимыми переходами в зависимости от температуры и соотношения летучести серы и теллура.

Заслуживает внимания недавно открытая на Сафьяновском месторождении зона развития гнездовой, прожилковой барит-сульфидной минерализации, которая по строению и структурам сходна с таковой в проводниках, трубах современных подводных гидротермальных построек бассейнов Манус и Лау. Она развивается внутри сплошных сульфидных медных и медно-цинковых руд, характеризующихся тонкозернистым строением, наличием колломорфных структур и слабой выраженной раскристаллизацией зерен сульфидов. Такие руды отличаются пористым строением и способностью к разрушению за счет быстро развивающихся процессов окисления на воздухе по причине тонкозернистого строения зерен сульфидов. Внутри гнезд, прожилков установлены выделения сульфосолей свинца и серебра: буланжерита, пираргирита, полибазита и диафорита, а также циковистого фрейбергита и фаматинита [7]. Состав упомянутых минералов приведен в табл. 1. Во внутренней зоне барит-сульфидной минерализации отмечается мышьяковистый пирит, который способен связывать примеси золота [10].

Основная часть рудовмещающих толщ на Урале подверглась региональному метаморфизму зе-

Таблица 1. Химический состав сурьмяных сульфосолей меди и серебра из промежуточной зоны сульфидно-баритовой жилы Сафьяновского месторождения, мас. %, по данным [7]

№ ан.	Ag	Cu	Fe	Zn	Pb	As	Sb	S	Сумма
1	60.83	0.00	0.01	0.00		0.02	22.30	17.40	100.56
2	62.08	0.12	0.00	0.00		0.00	22.84	17.14	102.18
3	61.79	0.41	0.02	0.00		0.00	22.45	16.80	101.47
4	69.43	4.46	0.22	0.13		0.00	11.23	14.80	100.27
5	29.03	17.35	0.37	9.68		0.00	25.66	20.73	102.82
6	18.08	23.03	0.32	9.61		0.15	24.61	22.38	98.18
7	19.60	23.77	0.30	9.89		0.00	26.07	22.80	102.43
8	18.35	24.99	0.17	10.43		0.16	26.29	22.49	102.88
9	0.20	43.10	0.50	2.71		1.87	23.32	28.39	100.11
10	23.80	0.04	0.32	2.59	29.49		26.10	18.51	100.85
11	23.28	0.55	0.53	3.15	29.35		25.41	18.67	100.94
12	24.53	0.47	0.43	1.77	30.11		27.28	18.69	103.28

Примечание. Анализы: 1–3 – пираргирит, 4 – полибазит, 5–8 – Zn-фрейбергит, 9 – фаматинит и 10–12 – диафорит. Здесь и далее жирным курсивом выделены содержания элементов, находящиеся в пределах погрешности ($<2\sigma$) энергодисперсионного микроанализа.

ленокаменной и пренит-пумпеллиитовой фации. Распределение теллуридов в пределах рудных тел, зон и месторождений определяется процессами собирательной перекристаллизации и дифференциации вещества. Колчеданные месторождения характеризуются наличием парагенетической ассоциации теллуридов с халькопиритом, блеклыми рудами и галенитом (Гайское, Карабашское, Узельгинское и другие). Развитию теллуридов в прожилково-вкрапленных рудах и рудных столбах Сафьяновского месторождения способствовало незначительное количество блеклых руд, которые к тому же замещались минералами энаргит-фаматинитового ряда, практически не содержащих изоморфной примеси теллура. Данный тип теллуридной минерализации подробно описан ранее [6].

В качестве примера, где проявились процессы анатексиса сульфидов и связанная с ними теллуридная минерализация рассматриваются руды Тарньерского месторождения [1]. Колчеданные руды и вмещающие их породы были подвержены интенсивному метаморфизму в термальном поле Помурской диоритовой интрузии. С его воздействием связано широкое развитие процессов перекристаллизации руд, с которыми связано широкое развитие порфиробластов рудообразующих минералов: пирротина, пирита, сфалерита и халькопирита. Метаморфические преобразования имели следствием и перераспределение золота и серебра. Как правило, на большей части колчеданных месторождений Урала, которые не испытали интенсивных метаморфических преобразований, повышенные содержания благородных металлов локализируются в сплошных медно-цинковых и (или) колчеданно-полиметаллических рудах. На Тарньерском месторождении золотом и серебром обогащены зоны вкрапленной сульфидной минерализации в метаморфизованных (до роговиков) вмещающих породах, разделяющих близко залегающие рудные тела. Собственно сплошные медные и медно-цинковые руды за редкими исключениями, отличаются рядовыми содержаниями благородных металлов, что является еще одним из следствий контактового воздействия на них диоритовой интрузии.

Образование золоторудной минерализации Тарньерского месторождения связано с ретроградной стадией контактового метаморфизма. В пользу этого свидетельствуют температуры формирования минеральных ассоциаций содержащих благородные металлы. В золотосодержащих вкрапленных рудах отмечаются самородные золото и висмут, теллуриды представлены гесситом, алтаитом и цумоитом [1]. Последующими исследованиями получены новые данные по составу упомянутых минералов и оценки температуры и летучести серы и теллура, а также обнаружены раклиджит и вольтинскит (табл. 2, 3). Значения температуры (T), летучести серы ($\log f_{S_2}$) и теллура ($\log f_{Te_2}$) в период формирования этих руд

соответственно составили: $T - 440-455^\circ\text{C}$; $\log f_{S_2} -$ от -5.5 до -5.8 ; $\log f_{Te_2} -$ от -9.1 до -8.8 .

Появление сульфидного расплава связано с пиком метаморфизма в условиях гранулитовой или амфиболитовой фации [9]. В условиях гранулитовой фации первые порции сульфидного расплава появляются при температуре выше 800°C , если состав руд, отвечает тройной эвтектике $PbS + FeS + (Zn,Fe)S$ ($Gn + Po + Sph$). При добавлении к данной системе халькопирита Cpy ($CuFeS_2$) эвтектический расплав $PbS + FeS + (Zn,Fe)S + CuFeS_2$ ($Gn + Po + Sph + Cpy$) появляется при 700°C . Появление сульфидного расплава в условиях отвечающих амфиболитовой фации возможно при 500°C и наличии арсенопирита Asp ($FeAsS$) в колчеданных рудах, что можно представить в виде следующей реакции: $Asp + Py = Melt + Po$. Наличие в составе руд достаточного количества сульфосолей меди и свинца, теллуридов и самородных металлов (в первую очередь висмута) может обеспечить генерацию расплавов, даже в условиях отвечающих зеленосланцевой фации метаморфизма [11]. Поступление этих элементов в расплав возможно за счет очистки пирита путем его плавления в рассмотренных выше условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций. Такие расплавы способны существовать вплоть до температуры кристаллизации висмута, составляющей 271°C .

Модель формирования золоторудной минерализации на основе ремобилизации золота сульфидными расплавами из ранее отложенных "обычных" колчеданных руд, подвергшихся метаморфизму при повышенных температурах и давлениях, привлекается для таких хорошо изученных месторождений как Брокен Хилл (Австралия), Сулиетьма (Норвегия) и Хемло (Канада) [9]. В качестве потенциальных объектов ее приложения упомянутые авторы относят еще около десятка крупных колчеданно-полиметаллических и медноколчеданных месторождений, для которых возможность парциального плавления сульфидов при условиях умеренных и высоких ступенях метаморфизма основывается на литературных материалах по физико-химическим параметрам условий метаморфизма вмещающих пород и руд. Исходя из этих соображений и данных по условиям метаморфизма вмещающих пород месторождений уральского типа, наряду с Тарньерским, достижение условий генерации сульфидных расплавов под воздействием контактового и регионального метаморфизма на колчеданные руды допускается для месторождений имени 50-летия Октября и Маукского, которые отличаются широким распространением пирротинных и пирротинсодержащих руд [4]. На обоих месторождениях выделяются прогрессивная и регрессивная стадии пострудного метаморфизма. Рудные залежи и вмещающие породы месторождения им. 50-летия Октября подверглись интенсив-

Таблица 2. Химический состав теллуридов Тарньерского месторождения

Образец	T-1285			T-1363				T-1363	
Минерал	Раклиджит PbBi ₂ Te ₄			Цумоит BiTe				Волынский AgBiTe ₂	
Pb	13.33	13.09	11.95	2.07	2.31	2.41	2.30	0	0
Bi	41.03	40.59	37.85	59.91	59.53	58.09	59.10	37.28	36.72
Sb	0.28	0.24	0.36	0.19	0.14	0.30	0.21	0.22	0.31
Te	44.33	44.44	43.12	38.82	38.71	38.92	38.98	43.64	43.22
S	0.07	0.04	0.05	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03
Au	0.01	0.03	2.21	0	0	0.04	0	0.03	0.01
Ag	1.11	1.01	4.16	0	0.04	0.06	0	19.40	19.15
Cu	0	0.09	0	0.10	0	0.02	0	0.20	0
Hg	0	0.01	0	0	0	0	0	0.06	0.12
Fe	0.02	0.08	0.07	0.03	0	0	0	0.14	0.04
Сумма	100.17	99.62	99.77	101.13	100.74	99.86	100.60	101.02	99.60
Образец	T-1363				С 1001-35.2				
Минерал	Гессит Ag ₂ Te				Раклиджит PbBi ₂ Te ₄				
Pb	0	0	0	0	12.06	11.48	11.13	12.67	11.74
Bi	0.02	0.01	0	0.07	43.55	44.05	44.45	43.16	43.84
Sb	0.28	0.23	0.33	0.15					
Te	36.84	37.28	36.78	37.10	43.65	43.56	43.89	43.93	43.90
S	0.06	0.07	0.16	0.08	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05
Au	0.06	0	0.37	0.01	0.04	0	0	0	0.07
Ag	62.95	62.1	62.53	63.03	0.59	0.67	0.56	0.55	0.73
Cu	0	0.01	0.04	0.09	0.41	0.48	0.27	0.40	0.33
Hg	0.07	0.11	0.03	0	0.09	0.14	0.12	0.08	0.03
Fe	0	0	0	0	0.26	0.18	0.20	0.23	0.18
Сумма	100.27	99.81	100.25	100.53	100.69	100.62	100.66	101.05	100.88

Примечание. Анализы, приведенные в табл. 1 и 2, выполнены В.Г. Гмыра в ИГГ УрО РАН рентгеноспектральным методом на микроанализаторе SX 100 (Самеса). Нулем обозначены содержания ниже чувствительности метода. Пустые клетки указывают на то, что анализ на указанные элементы не выполнялся.

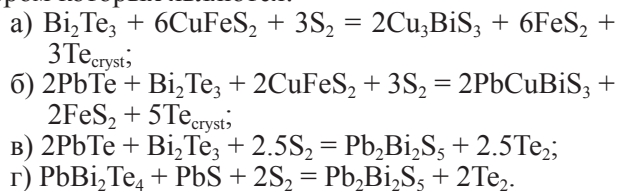
Таблица 3. Химический состав алтаита Тарньерского месторождения, мас. %

Образец	Определяемые элементы										Сумма
	S	Fe	Cu	Bi	Ag	Te	Sb	Au	Hg	Pb	
T-1363	0.02	0	0	0.55	0	37.39	0.26	0.02	0.02	61.19	99.46
	0.02	0	0	0.58	0	37.41	0.32	0	0.08	60.80	99.22
	0.02	0.05	0.15	0.61	0	37.17	0.31	0	0	60.63	98.94
	0.05	0.01	0.07	1.35	0.78	38.56	0.33	0	0.02	59.43	100.60
	0.03	0.05	0	1.66	0.58	38.00	0.24	0.03	0.08	59.47	100.14
	0.05	0.06	0.01	1.06	0	38.37	0.21	0.07	0.06	59.91	99.81
	0.02	0.03	0.12	1.02	0.01	37.93	0.23	0.01	0.26	60.03	99.67
T-1285	0.02	0.21	0.03	1.41	0.14	36.74	0.28	0	0.11	58.59	97.52
	0.03	0.02	0.11	1.20	0.15	37.12	0.26	0	0.02	58.96	97.87
	0.05	0.11	0.04	1.28	0.33	37.32	0.29	0.09	0.19	58.71	98.42
	0.03	0	0.03	1.41	0.31	37.11	0.32	0.16	0.09	59.36	98.83
	0.05	0.09	0.01	0.83	2.13	38.04	0.25	0.10	0.04	58.25	99.80
	0.05	0	0.11	0.87	2.41	37.54	0.19	0.08	0.09	58.33	99.67
	0.07	0.10	0	0.75	1.19	37.30	0.33	0	0.12	58.87	98.72
Скв.1490-124.2	0.05	0.05	0.05	0.88	0.96	37.86	0.23	0.01	0.14	59.54	99.76
	0.06	0.04	0.11	0.66	1.00	38.48	0.13	0.06	0.07	58.91	99.54
	0.11	0.02	0	0.82	0.75	37.71	0.16	0.03	0.16	59.31	99.07
	0.02	0.02	0	0.85	0.72	38.02		0.01	0.07	59.53	99.24
	0.03	0.06	0	1.43	0.39	38.48		0.06	0.30	59.28	100.02
Скв.1001-35.2	0.01	0.03	0	1.38	0.30	38.63		0.02	0.07	58.93	99.35
	0.06	0	0.03	1.28	0.27	38.32		0	0.09	59.30	99.36
	0.05	0	0.07	1.38	0.41	38.22		0.07	0.11	58.75	99.05

ному контактовому метаморфизму интрузий плагиогранитов и гранодиоритов. С прогрессивной стадией метаморфизма связано формирование роговиков кордиерит-бититового, кордиерит-биотит-антофиллитового и кордиерит-антофиллитового состава по надрудным мелкоподушечным спилитам, а также наложение кордиерита, биотита, антофиллита на подрудные метасоматиты и колчеданные руды. Регрессивная стадия фиксируется замещением продуктов прогрессивной стадии халькопиритом, магнетитом, пиритом, арсенопиритом, молибденитом, галенитом, карбонатами, кварцем и серицитом. В эту же стадию кристаллизовались самородный висмут и висмутин. На Маукском месторождении пострудные метаморфические изменения проходили в условиях альбит-эпидот-амфиболитовой фации. Они относятся к высокобарическому метаморфизму линейных зон, что подтверждается общим рассланцеванием пород и развитием таких минералов как гранат, сине-зеленая роговая обманка и биотит. Широко развиты полосчатые и гнейсовые текстуры, а также минеральные ассоциации с пирротинном магнетитом, кубанитом. Регрессивная стадия проявилась в хлоритизации и карбонатизации пород. В рудах происходило разложение пирротина с развитием мельниковит-пирита, марказита [4]. Руды рассматриваемых месторождений по сравнению с Тарньерским обеднены благородными металлами и теллуридом, минералы которых отмечаются крайне редко.

Многие золоторудные месторождения наряду с теллуридами характеризуются богатым набором сульфосолей висмута, серебра, свинца, сурьмы, ртути, которые также как и теллуриды способны накапливать примесь золота [8]. Основные объемы колчеданных руд Урала формировались в условиях благоприятных развитию блеклых руд. Остальные сульфосоли отмечаются эпизодически. Блеклые руды в качестве изоморфной примеси концентрируют висмут, теллур и серебро. Наличие блеклых руд не способствовало развитию остальных весьма многочисленных (по количеству минеральных видов) сульфосолей. По физико-химическим параметрам область развития блеклых руд ограничена со стороны высоких значений летучести серы энаргитом, со стороны низких – арсенопиритом [5].

Упомянутые сульфосоли рассматриваются как продукты обменных твердофазных сульфидов и теллуридов с участием паров серы и теллура, примером которых являются:



В результате выполненных исследований установлено, что в колчеданных рудах Урала возможны следующие варианты формирования теллуридной минерализации: в реликтах сульфидных труб древних курильщиков, пострудных метасоматических процессов и сульфидного анатексиса. На большей части месторождений развитие теллуридов связано с пострудными метасоматическими процессами перекристаллизации колчеданных руд.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (проекты 09-05-12035-офи_м) и ОНЗ РАН (Программы № 2 и 09-5-Т 1011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А. Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) // Записки РМО. 2010. № 6. 108–119.
2. Бортников Н.С., Викентьев И.В. Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в Мировом океане // Геол. рудн. месторожд. 2005. Т. 47, № 1. С. 16–50.
3. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков”. Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
4. Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмаилов М.И. и др. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 240 С.
5. Молошаг В.П. Использование состава минералов для оценки физико-химических условий образования колчеданных руд Урала // Литосфера. 2009. № 2. С. 28–40.
6. Молошаг В.П., Грабежеев А.И., Гуляева Т.Я. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфировых месторождений Урала // Записки ВМО. 2002. Ч. 131, № 5. С. 40–54.
7. Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ярославцева Н.С., Молошаг В.П. Минералогия и строение барит-сульфидных жил Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Уральский минералогический сборник № 17. Миасс–Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 12–19.
8. Ciobanu C. L., Cook N. J., Damian F., Damian G. Gold scavenged by bismuth melts: An example from Alpine shear-remobilizates in the Highiş Massif, Romania // Mineralogy and Petrology. 2006. 87. 351–384.
9. Frost B. R., Mavrogenes J. A., Tomkins A. G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism // Canadian Mineralogist. 2002. V. 40. P. 1–18.
10. Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., et al. Solubility of gold in arsenian pyrite // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69, № 11. P. 2781–2796.
11. Tomkins A.G. Three mechanisms of ore re-mobilisation during amphibolites facies metamorphism at the Montauban Zn–Pb–Au–Ag deposit // Mineralium Deposita. 2007. V. 42. P. 627–637.