

**В.П. Молошаг, И.В. Викентьев, А.И. Грабежев, Т.Я. Гуляева**

## **ТЕЛЛУРИДЫ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА**

В рудах колчеданных месторождениях Урала установлен обширный набор теллуридов, близкий видовой состав теллуридов обнаружен и на медно-золото-порфировых месторождениях. На рассматриваемых месторождениях присутствуют алтаит, гессит, силванит, эмпрессит, калаверит, креннерит, петцит, теллуровисмутит, тетрадимит, раклиджит, пильзенит. Выбороч-

ные анализы теллуридов, включая сингенетичные им самородный теллур, голдфилдит, сульфотеллуриды висмута и серебра, приводятся в таблице 1. Большинство перечисленных минералов наблюдается и на золото-сульфидно-кварцевых и золото-полисульфидно-кварцевых месторождениях [Константинов и др., 2000].

Распределение теллуридов в пределах

Таблица 1

Химический состав минералов теллура колчеданных и медно-золото-порфирировых месторождений, мас. %

Анализы	Минералы	Образцы	Tc	Ag	Au	Hg	Pb	Bi	Cu	Sb	S	Сумма
1	Сульфотеллурид серебра	Стержневая линза	26.51	65.42	0.10		0.25		0.85		6.63	99.76
2	Теллурависмутит	*	45.12	0.28	0.54	0.60	1.56	50.04	0.87	0.09		99.10
3	Раклиджит	008	42.41		0.91	0.79	15.97	40.49	0.05			100.62
4	Колорадоит	К 16/82	37.70	0.09	0.19	60.41		0.02				98.41
5	Калаверит	517	56.11	0.81	39.65	1.11		0.66				98.34
6	Гессит	2087/269.5	34.72	65.38	0.91	0.37	0.03	0.14				101.55
7	Эмпрессит	2087/269.5	44.12	52.20	0.57	0.37						97.56
8	Сульфотеллурид висмута	2066/124.5	33.95	0.28	1.16		5.81	55.57			3.99	100.76
9	Сильванит	**	62.76	14.08	22.84	0.67	Н.о.	Н.о.	0.11	Н.о.	Н.о.	100.41
10	Голдфиллит	**	32.14	0.08	Н.о.	0.54	Н.о.	Н.о.	40.49	0.47	25.88	99.60
11	Сульфотеллурид серебра	**	29.01	63.61	0.01	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.64	0.16	6.72	100.15
12	Теллур самородный	**	99.00	0.84	Н.о.	Н.о.	0.04	Н.о.	0.23	Н.о.	0.15	100.26
13	Вольфскит	**	44.33	17.95	Н.о.	Н.о.	0.15	35.31	Н.о.	Н.о.	Н.о.	97.74
14	Алтаит	368/105.5	34.31	0.11	0.49	0.70	63.80	1.08				100.49
15	Калаверит	56/474	54.30	Н.о.	44.05	1.18			Н.о.			99.53
16	Сильванит***	206-а/96.0	62.60	12.25	23.30	0.24			0.59	0.46		99.44
17	Креннерит***	206-а/96.0	57.98	4.14	36.74	Н.о.			1.33	0.48		100.67
18	Гессит	56/157	37.17	62.24		0.31		0.93	0.99			101.64
19	Теллур самородный	56/189.5	99.17	Н.о.		0.18		0.13	Н.о.			99.78
20	Алтаит***	206-а/96.0	38.15	0.07		0.32	59.84	Н.о.	0.88	0.28		99.54
21	Пильзенит***	210 / 192.5	33.49	Н.о.		0.26	0.12	65.94	Н.о.	0.26		100.07
22	Тетрадимит	1105 / 510	34.78	0.14	0.31	0.09	0.16	59.99	Н.о.	0.44	3.26	99.17

Примечание. Колчеданные месторождения: 1, 2 – Гайское; 3 – Учалинское; 4, 5 – Карабашское; 6–8 – Сафьяновское; 9–13 – Яман-Касинское; 14 – Маукское. Медно-золото-порфирировые месторождения: 15–21 – Березняковское; 22 – Юбилейное. Литературные источники: \* С.В. Колотов, В.Г. Гмыра (1990); \*\* В.В. Масленников (1999); \*\*\* А.И. Грабежов и др. (2000).

рудных тел, зон и месторождений определяется процессами собирательной перекристаллизации и дифференциации вещества. Основной объем залежей сплошных колчеданных руд сложен пиритом, который в тектонических процессах разлинзования рудных тел подвергается хрупким деформациям. Теллуриды, также как и самородное золото, развиваются совместно с халькопиритом, галенитом, сфалеритом и теннантитом, твердость которых меньше пирита и поэтому они более подвержены пластическим деформациям и сопровождающим их процессам растворения и переотложения. В связи с этим теллуриды приурочены к верхним частям рудных тел или их линзовидных фрагментов, образующихся под воздействием пострудных тектонических процессов, что отмечалось на Гайском, Карабашском и других месторождениях. Развитие пострудных процессов по вкрапленным, штокверковым рудам приводит к появлению обогащенных халькопиритом, а также теллуридами, рудных тел, или их участков, примером которых являются богатые медные руды Сафьяновского месторождения [Язева и др., 1991].

Теллуриды встречаются исключительно в борнитовых рудах. Отдельные находки гессита в борнитовых рудах колчеданных месторождений не противоречат этой тенденции, поскольку в описываемых случаях гессит является более поздним, наложенным по отношению к борниту, минералом [Качаловская, Хромова, 1970]. Данная тенденция также проявляется в рудах медно-золото-порфириновых и золоторудных месторождений [Коваленкер и др., 1990; Knittel, 1989; Porter, Ripley, 1985].

Колчеданные месторождения характеризуются наличием парагенетической ассоциации теллуридов с халькопиритом, блеклыми рудами и галенитом (Гайское, Карабашское, Узельгинское, Сибайское, Дегтярское и другие). Блеклые руды составляют до 3% от общего объема сульфидов, при концентрациях в них теллура до первых мас.%. Заметные содержания теллура (десятые и сотые доли процента) обнаружены также в галените. В остальных минералах концентрации теллура значительно ниже. Широкая распространенность теллуридов в прожилково-вкрапленных рудах и рудных столбах Сафьяновского месторождения связана с перекристаллизацией блеклых руд, а также последующим их замещением минералами энаргит-фаматинитового ряда, в процессе которого ос-

вобождался теллур, изоморфно входящий в структуру блеклых руд. На Гайском месторождении, где неизвестны находки энаргита, наличие включений теллуридов и самородного золота в зернах теннантита является довольно обычным явлением. Особого внимания заслуживает парагенезис теллуридов с голдфилдитом, окисью теллура и самородным золотом и теллуrom, который был обнаружен в рудах Яман-Касинского колчеданного месторождения [Масленников, 1999]. Аналогичные взаимоотношения теллуридов и блеклых руд вероятно имели место и на медно-золото-порфириновых месторождениях. В рудах Березняковского месторождения теллуриды совместно с энаргитом, теллуридами и самородным теллуrom приурочены к цинковистому теннантиту. Вполне возможно, что образование гессита, самородного теллура и цинковистого теннантита было связано с распадом теллуристого теннантита. Подтверждением этому служат исследования руд Марианского золото-порфиривого месторождения (Северный Лусон, Филиппины), где наблюдается ассоциация цинковистого теннантита и самородного теллура, образующихся за счет распада цинковистого голфилдита. В этом парагенезисе также отмечаются алтаит и теллуриды золота и серебра [Knittel, 1989].

В рудных телах, обогащенных теллуридами, количество самородного золота уменьшается или оно вообще не наблюдается. На Сафьяновском месторождении отмечается только наличие изоморфной примеси золота в сульфотеллуриде  $Bi_2Te_3S$  и гессите (см. табл. 2). Самородное золото на этом месторождении было обнаружено только во вкрапленных медно-цинковых рудах, встречающихся по периферии главной рудной зоны, а также в обогащенных галенитом участках сплошных медно-цинковых руд, где не отмечались теллуриды. На Гайском, Узельгинском и Карабашском месторождениях также прослеживается тенденция пространственной разобщенности видимых выделений самородного золота и теллуридов. Когда самородное золото наблюдается совместно с теллуридами, то среди них чаще всего отмечается гессит. В тех образцах руд Березняковского месторождения, где встречается калаверит самородное золото наблюдается значительно реже.

Пирротиновые руды отличаются меньшим количеством теллуридов, что вероятно связано с пониженными значениями летучести теллура. Соответственно основными минералами

Химический состав редко встречающихся минералов колчеданных месторождений (мас. %)

Анализ	Месторождение	Образец	Cu	Ag	Au	Bi	Pb	Hg	Fe	S	Te	Сумма
1	Им. III Интернационала	1115	22.94	0.00			0.00		42.75	32.98		98.67
2	Им. 50 лет Октября	112	0.12	Н.о.	Н.о.	98.54	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.		98.73
3			Н.о.	Н.о.	Н.о.	81.09	Н.о.	0.52	Н.о.	17.27	Н.о.	98.88
4	Тарньерское	1001/101.2	1.87	Н.о.	Н.о.	46.16	41.05	0.36	Н.о.	15.37	Н.о.	104.81

Примечание. 1 – кубанит  $\text{Cu}_{1.05}\text{Fe}_{2.23}\text{S}_{3.00}$ ; 2 – самородный висмут Bi; 4 – висмутин  $\text{Bi}_{2.16}\text{Hg}_{0.01}\text{S}_{3.00}$ ; 4 – козалит  $\text{Pb}_{2.07}\text{Bi}_{2.30}\text{Cu}_{0.31}\text{S}_{5.00}$ .

серебра, свинца, висмута являются их сульфиды и сульфосоли. На месторождении им. 50-летия Октября, где наблюдаются висмутин и самородный висмут, теллуриды вообще не отмечались. В рудах Тарньерского месторождения встречается козалит  $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_3$  (см. табл. 2) и пираргирит  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$  [Медноколчеданные..., 1988]. Для колчеданных месторождений Рудного Алтая была установлена прямая зависимость распространенности сульфосолей свинца, висмута и серебра с количеством пирротина и обратная – для теллуридов [Покровская, 1982]. Приведенные данные свидетельствуют, что при образовании пирротиновых руд теллуриды становятся неустойчивыми и происходит «отгонка» теллура в низкотемпературные участки, зоны рудообразующих систем. В пользу данного предположения говорят находки теллуридов и других минералов теллура в рудах Яман-Касинского месторождения [Масленников, 1999].

Одной из основных переменных, используемых при анализе минеральных равновесий, является температура, значения которой находились с помощью методов минералогической термометрии. Наиболее широко нами использовался электрум-сфалеритовый геотермометр, чему благоприятствует достаточно широкая распространенность самородного золота в рудах и то обстоятельство, что оно находится в тесной парагенетической связи со сфалеритом, а также галенитом, блеклыми рудами, борнитом. Основу электрум-сфалеритового геотермометра составляют данные по железистости ( $X_{\text{FeS}}$ ) сосуществующего с самородным золотом сфалерита и атомного количества серебра в само-

родном золоте  $N_{\text{Ag}} = \text{Ag}/(\text{Ag} + \text{Au})$  [Shikazono, 1985]. Значения температуры находились также на основе состава арсенопирита и данных экспериментальных исследований зависимости атомных количеств мышьяка от летучести серы и температуры [Скотт, 1984]. В отдельных случаях привлекались составы пирротина [Воган, Крейг, 1981].

Для анализа физико-химических условий образования теллуридов необходимы данные о летучести теллура. Летучесть теллура находилась нами с помощью электрум-гесситового геотермометра и анализа фазовых взаимоотношений минералов системе Au–Ag–Te [Бортников и др., 1988]. Данные о летучести теллура можно получить и на основе анализа условий равновесия галенита с алтаитом, как наиболее распространенного в рудах рассматриваемых месторождений теллурида. Для этих целей необходимо рассчитать значения константы равновесия реакции:  $2\text{PbTe} + \text{S}_2 = 2\text{PbS} + \text{Te}_2$ . Температура и летучесть серы определялись с помощью других минералогических геотермометров.

Полученные нами данные о летучести теллура приведены в таблице 3. Летучесть теллура для образцов руд Гайского (019) и Октябрьского (0625) месторождений, где в парагенезисе с самородным золотом отмечается гессит, определялась расчетным путем, на основе формулы, предложенной Н.С. Бортниковым с соавторами [1988], для чего использовались значения температуры, полученные с помощью электрум-сфалеритовой термометрии. Летучесть теллура для образца К 16/82 из Карабашского месторождения определялась на основе данных



Результаты расчета летучести теллура

Тип месторождений	Месторождения	Образец	T°C	1000/T°K	log f <sub>S2</sub>	log f <sub>Te2</sub>	Устойчивая ассоциация
Колчеданный	Гайское	019	446	1.39	-4.2	-6.93	Кв+Гес+Зол
		0625	279	1.81	-8.40	-12.39	Гес+Зол
	Октябрьское	0625-2	268	1.85	-8.65	-12.77	Гес+Зол
Медно-золото-порфировый	Березняковское	56-457	330	1.66	-6.7	-6.2	Кв
		28-368.5	411	1.46	-5.4	-5.05	Кв
		56/474*	> 313	<1.71		> -7.2	Гес+Зол
Колчеданный	Карабашское	К 16/82	405	1.47	-6.3	-10.0	Гес+Зол
			510	1.27	-4.9	-8.4	Гес+Зол
	Маукское	368/105.5	480	1.33	-5.2	-9.3	Гес+Зол

Примечание. \* температура и летучесть теллура оценены по положению предельной точки устойчивости калаверита на диаграмме  $\log f_{Te_2}-T$  (Бортников и другие, 1988). Сокращения: Кв – калаверит; Гес – гессит; Зол – самородное золото.

арсенипиритовой геотермометрии. Для Маукского месторождения использовались определения температуры и летучести серы по пирит-пирротиновому сольвусу.

Значения летучести теллура и температуры вынесены на фазовую диаграмму системы Au–Ag–Te [Бортников и др., 1988]. Для большей части образцов, приведенных в таблице 3, точки, отвечающие этим значениям, попадают в поле сосуществования гессита с самородным золотом, что не противоречит микроскопическим наблюдениям (см. рис.). Парагенезис гессита с калаверитом на Березняковском месторождении (образец 56/474) позволил получить только минимальные значения температуры и летучести теллура, которые соответствуют положению инвариантной точки на соответствующей диаграмме, поскольку в данном образце петцит не наблюдался [Грабежев и др., 2000]. Фигуративные точки тех образцов, где отмечаются теллуриды золота, также попадают в поле ассоциации гессит + золото; штриховкой показана область кристаллизации золото-теллуридного промышленного типа руд, представленного месторождением Флоренсия, Республика Куба.

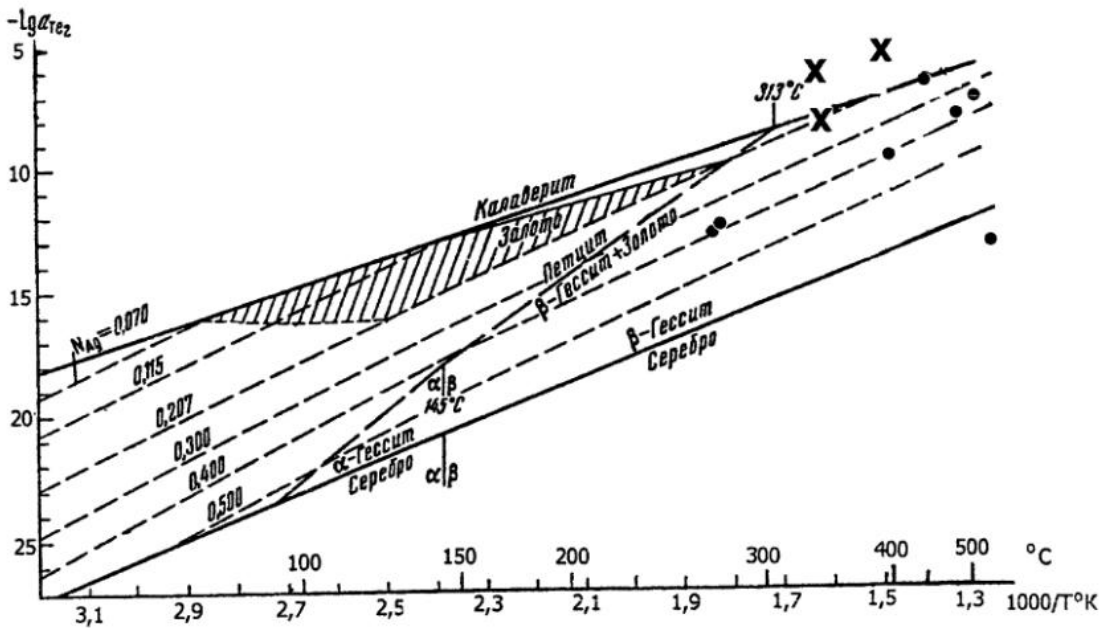
Преобладающая часть образцов, для которых нами определялись значения температуры и летучести серы, характеризуется отсутствием оптически видимых выделений теллу-

ридов, что вероятнее всего связано с изоморфным вхождением основной части теллура в кристаллические решетки блеклых руд и галенита. Располагая определениями температуры и значениями  $N_{Ag}$ , можно перейти к прогнозу теллуридов золота и серебра на основе использования областей (полей) их существования, определяемых по фазовой диаграмме системы Au–Ag–Te в координатах  $\log f_{Te_2}-1/T^\circ K$ . С учетом трудности оптической диагностики теллуридов серебра мы допускаем наличие гессита и петцита в значительно большей части образцов золотосодержащих руд, образовавшихся в условиях халькопиритовой фации.

Измеренные концентрации примеси золота в гессите (см. табл. 1) не превышают 1.0 мас.%, что соответствует значению отношений связанных с гесситом концентраций золота и серебра на уровне 1:60. Для большинства руд колчеданных месторождений эти значения находятся в пределах от 1:10 до 1:30. Эти материалы не противоречат тому, что в рудах данных месторождений определенная часть золота, помимо гессита и самородного золота, может быть связана и с теллуридами других, кроме золота и серебра металлов.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследования руд колчеданных и медно-золото-порфировых месторождений, с уче-



$\text{Log } f_{\text{Te}_2} - 1/T^\circ\text{K}$  диаграмма стабильности Au-Ag-Te минералов.

Область, соответствующая условиям отложения золото-теллурических руд месторождения Флоренсия, выделена штриховкой (по Бортникову и др., 1988). Точки обозначают значения  $\text{log } f_{\text{Te}_2}$  руд колчеданных месторождений; крестики – медно-золото-порфировые руд.

том ранее выполненных работ, показали наличие в них алтаита, гессита, сильванита, эмпресита, калаверита, креннерита, петцита, теллуридов висмута  $\text{Bi}_3(\text{Te,S})_4$  и серебра  $\text{Ag}_3\text{TeS}$ .

2. Образование теллуридов определяется условиями метаморфических преобразований руд. Теллуриды не наблюдаются в борнитсодержащих рудах. Наибольшим разнообразием минеральных видов минералов теллура характеризуются руды халькопиритовой фации. В пирротиновых рудах количество минеральных видов теллуридов уменьшается. На колчеданных месторождениях теллуриды и самородное золото встречаются раздельно, что связано с наличием изоморфной примеси золота в теллуридах.

3. С помощью методов минералогической термометрии получены данные о температуре,

летучести серы и теллура в период формирования теллуридных ассоциаций, которые могут служить основой прогноза минеральных форм нахождения золота в рудах.

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

#### Список литературы

- Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д. и др. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) // Геол. рудн. месторожд., 1988. Т. 30. № 2. С. 49–61.
- Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 576 с.
- Грабежеев А.И., Сазонов В.Н., Мурзин В.В. и др. Березняковское золоторудное месторождение (Южный Урал, Россия) // Геол. рудн. месторожд., 2000. Т. 42. № 1. С. 38–52.

*Качаловская В.М., Хромова М.М.* О бетехтините, гессите и штроейерите из борнитовых руд месторождения Уруп // Геол. рудн. месторожд. 1970. Т. 12. № 10. С. 93–97.

*Коваленкер В.А., Прокофьев В.Ю., Левин К.А., Залибекян М.Л.* Физико-химические условия формирования сульфидно-теллуридной минерализации Меградзорского рудного поля в Армении // Геология рудных месторождений. 1990. Т. 32. № 6. С. 18–35.

*Колотов С.В., Гмыра В.Г.* Редкие минералы Молодежного медноколчеданного месторождения // Ежегодник-1989 ИГГ. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 80–82.

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

*Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. 348 с.

Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение / Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмагилов М.И. и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 240 с.

*Покровская И.В.* Минералогия и условия образования полиметаллических месторождений (Лениногорский район Рудного Алтая). Алма-Ата: Наука, 1982. 130 с.

*Скотт В.Д.* Использование сфалерита и арсенопирита для оценки температур и активностей серы в гидротермальных месторождениях // Физико-химические модели петрогенеза и рудообразования. Новосибирск: Наука, 1984. С. 41–49.

*Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В.* Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геол. рудн. месторожд. 1991. Т. 33. № 4. С. 47–58.

*Knittel U.* Composition and association of arsenian goldfieldite from the Marian gold deposit, Northern Luzon, Philippines // Miner. Petrol. 1989. Vol. 40. N. 2. P. 145–154.

*Porter E.W., Ripley E.* Petrologic and stable isotope study of the gold-bearing breccia pipe at the Golden Sunlight deposit, Montana // Econ. Geol. 1985. Vol. 80. N. 6. P. 1689–1706.

*Shikazono N.* A comparison of temperatures estimated from the electrum – sphalerite – pyrite – argentite assemblage and filling temperatures of fluid implications from epithermal Au – Ag vein – type deposits in Japan // Econ. Geol., 1985. Vol. 80. N. 5. P. 1415–1424.