

В. В. Масленников, Р. Херрингтон, Ф. П. Буслаев, К. Стенли

САМОРОДНЫЙ ТЕЛЛУР, ТЕЛЛУРИДЫ И СУЛЬФОТЕЛЛУРИДЫ В СУЛЬФИДНЫХ ТРУБАХ «ЧЕРНОГО КУРИЛЬЩИКА» ЯМАН-КАСИНСКОГО МЕДНО-ЦИНКОВО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

V. V. Maslennikov, R. Herrington, F. P. Buslaev, C. Stenley

NATIVE TELLURIUM, TELLURIDES AND SULPHOTELLURIDES IN THE SULPHIDE TUBES OF BLACK SMOKERS IN YAMAN-KASY COPPER-ZINC-PYRITE DEPOSIT (SOUTH URALS)

Are given the first data on mineralogical and temperature zonality of the sulphide tubes of black smokers. Four zones are distinguished: external — low-temperature melnikovite-pyrite-marcasite, interior — high-temperature chalcopyrite and axial — sphalerite and/or quartzos. The most abundant segregations of native tellurium, tellurides and sulphotellurides and covellite are observed at boundary of chalcopyrite and melnikovite-pyrite-marcasite zones. Tellurides, represented by sylvanite, hessite, palladium-coloradoite and altaite, are replaced by native tellurium and sulphotellurides among which are established Ag-sulphotellurides — $Ag_4(Te,S)_3$ and gold-silver — $(Ag,Au,Cu)(Te,S)$. Appearance of tellurium and sulphotellurides is explained by concurrent sulphidization and oxidation processes, that considered as the phenomenon of near-hydrothermal halmyrolysis of sulphide tubes.

Введение

К настоящему времени состав и минералогическая зональность труб «черных курильщиков», открытых в зонах спрединга современных океанов, детально охарактеризованы [13, 14, 15]. Находки сульфидных «труб» «черных курильщиков» в древних колчеданных месторождениях чрезвычайно редки и недостаточно изучены. Небольшие фрагменты сульфидных «труб» были обнаружены С. Скоттом на месторождении Куроко [19], Е. Оудин и Г. Константиноу на месторождениях Кипра [18], В. В. Масленниковым на Октябрьском [5] и позднее на Александринском и Яман-Касинском месторождениях Южного Урала. Во время совместной российско-британской экспедиции в 1995 г. Р. Херрингтоном и В. В. Масленниковым на месторождении Яман-Касы были собраны фрагменты хорошо сохранившихся сульфидных «труб», сопоставимых по минералогической зональности с трубами современных «черных курильщиков». Многие сульфидные «трубы» Яман-Касинского месторождения содержат значительное количество крупных выделений самородного теллура, теллуридов и сульфотеллуридов, пока не найденных в современных аналогах. Эти минералы, имеющиеся на многих колчеданных и жильных гидротермальных месторождениях Урала [11], несут важную информацию, необходимую для создания минералогической модели колчеданообразования. В данной статье предлагаются первые материалы по закономерностям локализации, составу и взаимоотношениям теллура, теллуридов и сульфидов в «трубах» «черных курильщиков», являющихся главными свидетелями истории гидротермально-осадочного отложения Яман-Касинского медно-цинково-колчеданного месторождения.

Геологическая позиция

Яман-Касинское месторождение располагается в Медногорском районе, который рассматривается как часть Сакмарской структурно-формационной зоны — фрагмента окраинного моря, существовавшего в ордовике-девоне на периферии Уральского палеоокеана [4]. Месторождение залегает среди риолит-дацитовых эффузивов блявинского риолит-базальтового комплекса. Рудная залежь имеет форму линзы диаметром 100 м с выпуклой кровлей. Максимальная мощность линзы, которая представляла собой сульфидный холм — 37 м. Центральная часть холма сложена сплошными халькопирит-сфалерит-пиритовыми рудами, на флангах располагаются ритмично-слоистые псефитовые и псаммитовые рудокластиты, переслаивающиеся с гематит-

кварцевыми госсанитами — продуктами субмаринного окисления колчеданных руд. Холмообразная форма залежи, присутствие рудокластитов, оруденелых вестиментифер, продуктов распада промежуточных твердых растворов меди, железа и цинка, «халькопиритовой болезни» в сфалерите и других признаков, характерных для океанских сульфидных руд, позволили считать рудную залежь месторождения Яман-Касы древним аналогом разрушенного «черного курильщика». Более подробная информация по этому вопросу опубликована ранее [4].

Методика исследований

Сульфидные «трубы» «черных курильщиков» обнаружены в процессе рудно-фациального картирования карьера Яман-Касинского медноколчеданного месторождения в 1992—1995 гг. Теллурсодержащие трубы отобраны из негабаритных блоков сфалеритовой руды, добытых из кровли рудной залежи на участке ее максимальной мощности. Обломки других сульфидных «труб», не содержащие теллуридов, были отобраны из рудных брекчий при составлении литологической колонки южной выклинки колчеданной залежи. Продольные и поперечные срезы труб исследовались в отраженном свете на микроскопе Аxioplan. Анализы теллура, теллуридов и сульфидов выполнены в департаменте минералогии Музея Естественной Истории в Лондоне с использованием микрозонда «Newcamesa» и в лаборатории физики минералов в Институте минералогии УрО РАН на микрозонде «Geol». Взаимоотношения тонких сростаний сульфотеллуридов выяснялись по растровым «картам», дающим приближенно-количественную цветовую характеристику для Au, Ag, Te, S, Pb, Hg, As (микрозонд «Newcamesa»).

Минералогическая зональность

В строении теллурсодержащих «труб» по преобладающим минералам обычно выделяются две-три или четыре зоны: наружная — марказит-пиритовая; внутренняя — халькопиритовая и осевые — сфалеритовая и/или кварцевая. Каждая зона может подразделяться на несколько подзон в зависимости от количества примесей других минералов (рис. 1).

1. Наружная марказит-пиритовая зона труб сложена колломорфными, почковидными или дендритовидными агрегатами мельниковит-пирита-1 и марказита-1 (рис. 1, подзона 1). Колломорфные агрегаты содержат многочисленные псевдоморфозы кварца по нитчатым бактериям. Кварц также заполняет пористое пространство между марказит-пиритовыми почками и дендритами. Участками корочки мельниковит-пирита-1 несут признаки растрескивания с образованием автохтонных микробрекчиевых структур. Сульфидные обломочки цементируются и частично замещаются кварцем.

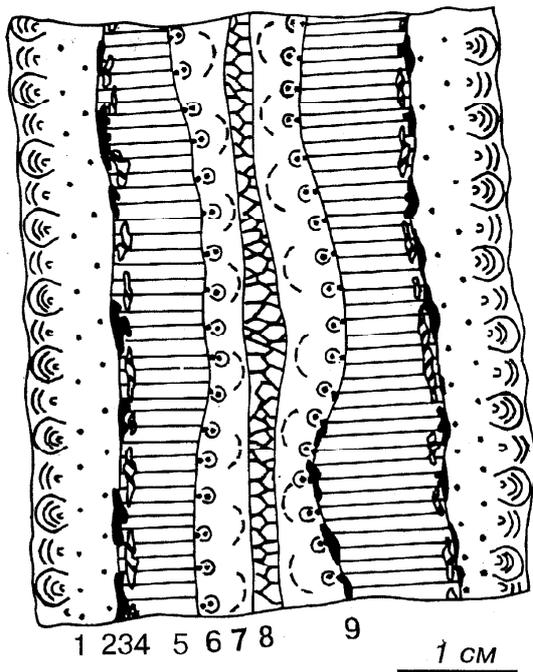


Рис. 1. Минералогическая зональность сульфидной «трубы» «черного курильщика» Яман-Касинского медно-цинково-колчеданного месторождения.

Схема составлена на основе продольного среза обр. № 0—1. 1 — колломорфная и дендритовидно-сложенная мельниковит-пиритовая подзона с реликтами нитчатых бактерий; 2 — кварц-халькопирит-сфалерит-марказит-пиритовая подзона; 3—5 — подзоны халькопиритовой зоны: 3 — теллурсодержащая, 4 — теллуридсодержащая, 5 — «чистая» от минеральных примесей; 6 — с кварцем, марказитом и сфалеритом; 7 — сфалеритовая; 8 — кварцевая; 9 — налеты теллура на внутренней поверхности халькопиритовой зоны. Длина линейки — 1 см

По мере приближения к внутренней части колломорфной корки увеличивается интенсивность замещения мельниковит-пирита-1 кристаллически-зернистым марказитом-2, эвгедральным пиритом-2 и кварцем. В этой же подзоне (рис. 1, подзона № 2) кристаллы низкожелезистого сфалерита (Fe 0.3 — 1.79 мас. %) выросли на кристаллы марказита-2. Взаимоотношения сфалерита и халькопирита сложные. В одних случаях кристаллы халькопирита обрастают более поздними каемками сфалерита, в других — сфалерит содержит тонкую эмульсиевидную вкрапленность халькопирита, более известную как «халькопиритовая болезнь» [5, 13, 14]. Максимальные концентрации халькопирита наблюдаются в ядре кристаллов сфалерита. Нередко сфалерит почти полностью замещен халькопиритом. Кварц частично корродирует следующую халькопиритовую зону.

Ориентировка марказит-пиритовых дендритов и почек указывает на центробежный рост колломорфных корок.

2. Халькопиритовая зона (подзоны №№ 3, 4, 5 на рис. 1) представлена почти мономинеральными агрегатами пластинчатых кристаллов халькопирита. Халькопирит, в целом, очень близок к стехиометрическому (табл. 1).

Поблизости от наружной границы зоны (подзона № 3 на рис. 1) встречаются многочисленные зерна пористого самородного теллура размером до 100—200 мкм (рис. 2). Отдельные зерна теллура, имеющие коричнево-черный цвет, характеризуются повышенными содержаниями серы (табл. 1). Отмытые этиловым спиртом зерна имеют почти белый цвет.

В следующей по направлению к оси трубы узкой (100—200 мкм) подзоне № 4 (рис. 1) появляются галенит (Pb 86.95; S 12.74, Te 0.11), ковеллин (Cu 65.2; S 33.46, Fe 1.17, Pb 0.67; Ag 0.23). Ковеллин встречается в виде мелких зерен, корродирующих пластинки халькопирита. Подзона 4 отличается обилием разнообразных теллуридов, лишь иногда содержащих прожилки самородного теллура и сульфотеллуридов серебра и золота. Срастания мелких зерен разнообразных по составу теллуридов иногда достигают размеров 100 — 200 мкм. Наиболее широко представлены сиванит, гессит, колорадоит, алтаит и корродированные кубы пирита-2.

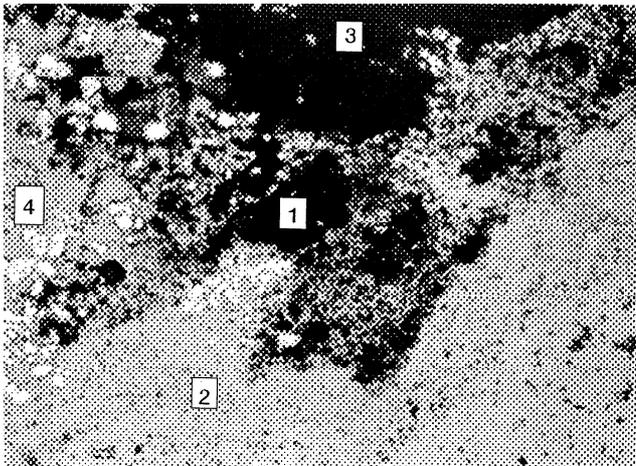


Рис. 2. Выделения самородного теллура (1) на внешней границе халькопиритовой зоны. 2 — халькопирит, 3 — кварц, 4 — пирит. Отраженный свет. Длина поля — 220 мкм

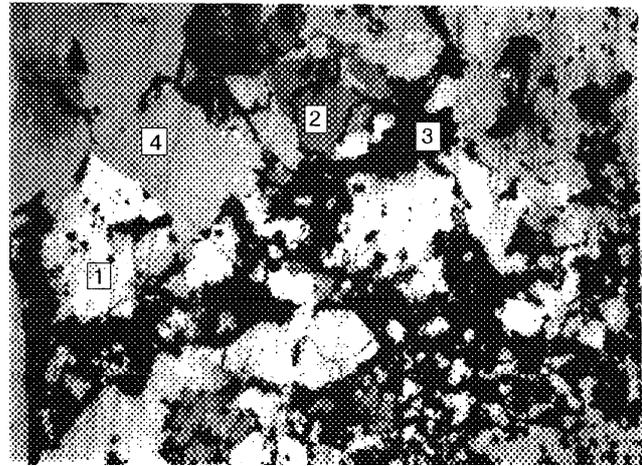


Рис. 3. Замещение сиванита (1) и гессита (2) агрегатами сульфотеллуридов (3), содержащих примесь самородного теллура. 4 — халькопирит. Отраженный свет. Длина поля — 220 мкм

Кремново-белые зерна сиванита ($AgAuTe_4$ — табл. 1) образуют тонкую эмульсионную вкрапленность в гессите, реже встречаются в виде изометричных реликтовых зерен, частично замещенных сульфотеллуридами (рис. 3). В наиболее крупных зернах (до 30 мкм) отмечаются характерные полисинтетические двойники. Некоторые зерна сильно анизотропны, обладают значительным двуотражением.

Отдельные серо-белые зерна гессита (Ag_2Te) размером до 30 мкм встречаются нечасто. Гораздо чаще наблюдаются прожилки гессита в халькопирите или гессит образует тонкие мирмекитовые срастания с сиванитом.

Колорадоит (H_2Te) — тонкая вкрапленность и реже отдельные зерна розовато-серого цвета, размером до 10 мкм. Образует срастания с гесситом и сиванитом. По данным микрозондового анализа, выделяется чистая и палладиастая разновидность колорадоита (табл. 1).

Алтаит (PbTe) — оловянно-белый минерал с желтоватым оттенком и относительно высокой отражательной способностью, встречается в виде мельчайших, рассеянных в халькопирите зерен размером 2—3 мкм. Реже встречаются более крупные зерна, как правило, сростшиеся с галенитом.

Сульфотеллуриды образуют тончайшие сростания в прожилках мощностью до 10 мкм, замещающие силъванит и гессит. В целом, сростания сульфотеллуридов темно-серого и серого цвета, иногда с коричневым оттенком, оптически анизотропные, с цветными эффектами в иммерсии — от коричневых до серых. На растровых цветных картах по содержаниям Au и Ag выделяются, по крайней мере, две разновидности сульфотеллуридов: золото-серебряная разновидность образует каемки замещения вокруг силъванита, серебряная — замещает гессит. По результатам микронзондового анализа для первого, более светлого сульфотеллурида рассчитываются формулы ряда (Au, Ag, Cu)(Te, S) — (Au, Ag, Cu)₄(Te, S)₃, для второго — Ag₄(Te, S)₃ или, приблизительно — Ag₈Te₃S₃ (табл. 2). Последний минерал близок по составу к бенлеонардиту — Ag₈(Sb, As)Te₂S₃. Однако, содержания мышьяка и сурьмы в обнаруженном сульфотеллуриде обычно меньше 0.01, лишь в некоторых пробах они достигают 1.82 и 0.16 мас. %, соответственно. Близкий по составу сульфотеллурид (Ag₃TeS) обнаружен ранее на Гайском медноколчеданном месторождении Южного Урала [8].

Таблица 1

Сульфотеллуриды переменного состава из сульфидных труб Яман-Касинского месторождения (мас. %)

№	Проба	Ag	Au	Hg	Cu	Fe	S	Te	As	Формула минерала
1	L-1995-27	52.81	6.75	0.99	0.67	0.43	10.03	23.92	1.84	(Ag _{0.93} Au _{0.06} Cu _{0.01}) (Te _{0.35} S _{0.59} As _{0.04})
2	L-1995-36	55.08	3.62	0.28	0.71	0.19	8.98	35.35	0.00	(Ag _{0.93} Au _{0.04} Cu _{0.02}) (Te _{0.5} S _{0.5})
3	L-1995-26	37.43	8.01	0.49	4.86	0.18	9.09	43.86	0.00	(Ag, Au, Cu) ₃ (Te, S) ₄
4	L-1995-84	62.54	0.06	0.73	0.24	0.19	5.39	29.39	1.82	Ag _{4.0} (S _{1.1} Te _{1.6} As _{0.17})
5	L-1995-99	66.82	0.01	0.00	0.10	0.05	7.10	27.43	0.04	Ag _{4.11} (Te _{1.43} S _{1.47})
6	L-1995-100	66.62	0.05	0.06	0.12	0.07	8.22	27.92	0.00	Ag _{3.96} (Te _{1.40} S _{1.64})
7	L-1995-24	63.61	0.01	0.00	0.64	0.52	6.73	29.01	0.00	Ag _{4.02} (Te _{1.55} S _{1.43})
8	L-1995-25	66.17	0.00	0.09	0.55	0.37	7.36	27.99	0.00	Ag _{4.04} (Te _{1.45} S _{1.51})
9	L-1995-9	67.56	0.40	0.32	0.30	0.12	9.06	25.36	0.00	Ag _{3.96} (Te _{1.26} S _{1.79})

Примечание: №№ 1 — 2 — группа (Ag, Au, Cu)(Te, As, S), № 3 — группа (Ag, Au, Cu)₃(Te, S)₄, №№ 4 — 9 — группа Ag₄(Te, S)₃.

Таблица 2

Химический состав самородного теллура, теллуридов и халькопирита из сульфидных «труб» месторождения Яман-Касы (мас. %).

Минералы	Кол-во анал.	Ag	Au	Hg	Co	Fe	Te	S	Zn	Pd	Σ
силъванит	4	13.65	23.51	-	0.24	0.10	63.46	-	-	-	100.96
		14.16	22.88	-	0.14	0.12	62.60	-	-	-	99.90
		14.36	22.13	-	0.22	0.09	62.45	-	-	-	99.85
		14.08	22.84	-	0.11	0.07	62.71	-	-	-	99.81
гессит	4	59.15	-	-	0.14	-	40.39	0.14	-	-	99.82
		58.63	-	-	0.04	-	41.38	0.47	-	-	100.52
		60.31	-	-	0.07	-	39.22	0.25	-	-	99.85
		60.63	-	-	0.27	0.13	38.87	0.08	-	-	99.98
природный теллур	5	-	-	-	0.73	0.76	96.59	1.11	-	-	99.19
		-	-	-	0.40	0.32	95.17	1.23	0.03	-	97.15
		-	-	-	0.32	0.17	97.90	0.26	0.09	-	98.74
		-	-	-	0.23	0.13	99.00	0.15	0.08	-	99.59
колорадоит	1	-	-	60.65	0.17	0.03	40.37	-	-	0.08	101.22
		-	-	60.35	0.24	0.16	40.15	-	-	0.31	101.21
колорадоит (палладистый)	2	-	-	61.14	0.13	0.05	39.85	-	-	0.41	101.58
халькопирит	3	-	-	-	34.12	31.34	-	33.74	-	-	99.20
		-	-	-	34.01	31.05	-	34.51	-	-	99.57
		-	-	-	33.25	31.12	0.40	34.02	0.18	-	98.97

Примечание: Анализы выполнены С. Stanley и В. В. Масленниковым в лаборатории Natural History Museum, Newsamesa в 1995 г.

Почти всегда с сульфотеллуридами ассоциируют тонкие коричневатые-черные включения самородного теллура размером менее 5 мкм. С удалением от наружной границы зоны самородный теллур, а затем и теллуриды исчезают. Кристаллы халькопирита практически не содержат теллура. Однако в интерстициях между кристаллами на растровых изображениях наблюдаются повышенные содержания теллура и серебра. Изредка вершины кристаллов халькопирита обрастают и замещались кварцем. В последнем случае они покрыты налетами самородного теллура (№ 9 на рис. 1).

Текстуры избирательного роста, а также положение вершин идиоморфных кристаллов указывают на рост халькопиритовых друз по направлению внутрь трубы. Иногда на вершины кристаллов халькопирита нарастают почки радиально-лучистого марказита. Отдельные почки марказита почти полностью замещены ангедральным халькопиритом и кварцем.

3. Сфалеритовая зона (№ 7 на рис. 1) сложена агрегатами почковидного железистого и умеренно-железистого (Fe 2.6—5.03 мас. %) сфалерита, росшими по направлению к оси трубы. В некоторых теллурсодержащих трубах сфалеритовая зона отсутствует.

4. Осевой канал (№ 8 на рис. 1) многих сульфидных труб заполнен друзовым кварцем. Иногда сохраняется остаточная полость канала, которая достигает диаметра 2—3 мм.

В целом, зональность других труб, обнаруженных на Яман-Касинском месторождении, может отличаться от зональности охарактеризованных теллурсодержащих труб. Например, в одной из труб, не содержащей теллуриды, во внутренней части халькопиритовой зоны обнаружены зерна, решетчатые срастания ламелл халькопирита и промежуточного твердого раствора. Продукты промежуточного твердого раствора халькопирит-пирротинового ряда, содержащие Zn, охарактеризованы ранее на Яман-Касинском месторождении и в «трубах» современных «черных курильщиков» [5]. Решетчатые зерна обрастают почковидным сфалеритом, содержащим волосовидные жилки, и беспорядочно или концентрически распределенную густую «эмульсию» халькопирита. В других трубах в осевой части появляется значительное количество марказита и кварца.

При всем многообразии сульфидных «труб» они имеют как минимум две зоны, фиксирующие центробежный (наружная зона) и центростремительный (внутренняя зона) рост сульфидных агрегатов. В наиболее простом случае встречаются трубы, состоящие из двух зон: наружной — колломорфной марказит-пиритовой — и внутренней — пластинчато-кристаллической халькопиритовой. Халькопиритовая зона в таких трубах иногда имеет ритмичное строение, очевидно, отражающее пульсационный характер гидротермальной деятельности.

Температурная зональность

По минералам-индикаторам может быть приблизительно реконструирована температурная зональность труб «черных курильщиков». Так, например, мельниковит-пирит-1, в отличие от остальных сульфидов, встречающихся в трубе, является низкотемпературным, так как диссоциирует в вакууме при температурах ниже 70—100 °С. Это согласуется с результатами замеров температур на поверхности современных труб «черных курильщиков» [16]. Присутствие марказита-2 в подзоне 2 также указывает на невысокие температуры минералообразования (менее 200 °С по [17]).

Образование кубических кристаллов пирита на границе с халькопиритовой зоной, по-видимому, связано с некоторым повышением температуры по сравнению с предыдущей подзоной. Известно, что повышение температуры рудообразующих растворов приводит к диссоциации комплексированного иона S_2^{2-} на два иона S^{2-} . Уменьшение в растворах концентрации S_2^{2-} и, наоборот, возрастание S^{2-} приводит сначала к появлению пирита с дефицитом серы (n-тип), а затем пирротина или халькопирита, содержащего ионы S^{2-} . Значительные концентрации иона S_2^{2-} при относительно высоких температурах обычно не реализуются [10]. Именно по этой причине в переходной, более высокотемпературной зоне мельниковит-пирит, имеющий проводимость p-типа, неустойчив и образуется эвгедральный пирит с проводимостью n-типа, который по мере перехода к внутренней части трубы также исчезает.

Низкие температуры в подзоне № 3 подтверждаются присутствием самородного теллура, так как самородный теллур реагирует с водой при температурах выше 100—160 °С с образованием TeO_2 и выделением водо-рода [1].

Температуры, рассчитанные по кобальтовому геотермометру [2], в халькопиритовой зоне теллурсодержащих труб варьировали от 100 до 310 °С.

Появление марказита в центральной части трубы свидетельствует о снижении температур при затухании гидротермальной деятельности, так как марказит обычно превращается в пирит при $>240\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17].

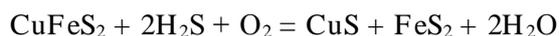
Присутствие продуктов распада твердых растворов халькопирита и пирротина в некоторых трубах, не содержащих теллуриды, показывает, что температуры гидротерм нередко превышали $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13, 14] или даже $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

Обсуждение и выводы

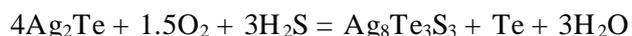
Таким образом, охарактеризованные трубы имеют двучленное строение, характерное для многих труб современных «черных курильщиков» [13, 14]. Судя по признакам разнонаправленного роста сульфидных агрегатов, наиболее древней является барит-сфалерит-халькопирит-марказит-2-пирит-2-кварцевая подзона (№ 3). По аналогии с современными гидротермальными трубами на месте этой зоны первоначально существовали либо ангидритовая, либо мельниковит-сфалерит-опаловая скорлупа, с которой и начинался рост трубы [13, 14, 15].

Между внутренней халькопиритовой и наружной мельниковит-пиритовой зонами разница температур составляла не менее $100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая разница в температурах могла быть обусловлена только взаимодействием раскаленных труб с холодной морской водой. Внешняя граница халькопиритовой (или пирротиновой) зоны обычно считается местом встречи окислительной холодной морской воды, поступавшей снаружи, и восстановительных гидротермальных растворов, просачивающихся из канала трубы [13]. В современных трубах «черных курильщиков» на этой границе появляется борнит и ковеллин, образовавшиеся при окислении халькопирита [13, 14, 15]. Высокая активность кислорода в подзоне № 2 подтверждается низкими содержаниями Fe в сфалеритах, указывающими на формирование сульфидов Zn в равновесии с пиритом, а не с пирротинном [12]. Во внутренней части трубы низкая активность кислорода фиксируется появлением железистого сфалерита или продуктов распада халькопирротина. На менее окислительные условия во внутренней зоне по сравнению с внешней указывает присутствие халькопирита, который обычно существует при более низкой летучести кислорода, чем пирит [3].

Так же, как и современные «черные курильщики», сульфидные «трубы» месторождения Яман-Касы подвергались окислению. Очевидно, в подзоне 4 в результате смешения H_2S и O_2 происходило окисление халькопирита с образованием ковеллина и пирита:



В этой же подзоне (№ 5) при благоприятных температурах (возможно, для гессита $100\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$ по [9]), формировались теллуриды. Дальнейшие одновременные процессы сульфидизации и окисления приводили к разложению теллуридов и образованию сульфотеллуридов и самородного теллура по следующей вероятной реакции:



В результате полного окисления теллуридов на наружной поверхности халькопиритовой зоны появлялись обильные выделения самородного теллура, содержащие примесь самородной серы. Налеты самородного теллура, изредка встречающиеся на внутренней поверхности халькопиритовой зоны, вероятно, отлагались при окислении H_2Te в период затухания гидротермальной деятельности.

Таким образом, сульфотеллуриды и самородный теллур, обнаруженные в сульфидных «трубах» месторождения Яман-Касы, являются индикаторами взаимодействия холодных окислительных морских вод и остывавших гидротермальных флюидов. Окислительный процесс преобразования сульфидов и теллуридов в этих условиях можно рассматривать как пригидротермальный гальмиролиз. В пригидротермальном гальмиролизе, в отличие от собственно гальмиролиза, участвует не только O_2 , поступающий из морской воды, но и одновременно H_2S , привносимый гидротермальными растворами.

Благодарности

Авторы благодарят Муфтахова В. А., Чурина Е. И. и Тесалину С. Г. за помощь в выполнении исследований. Особую благодарность авторы выражают доктору геол.-мин. наук В. В. Зайкову за организацию совместной российско-британской экспедиции, во время которой были собраны уникальные материалы по трубам самых древних «черных курильщиков».

Литература

1. Бандман А. Л. Теллур и его соединения// Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов V—VIII групп. Л.: Химия, 1989. С. 284—296.
2. Безмен Н. И. и др. Пирит-халькопиритовый геотермометр: распределение кобальта//Геохимия, 1978. № 3. С. 384—389.
3. Бримхолл Д. Х., Крерар Д. А. Рудные флюиды: от магматических до гипергенных//Термодинамическое моделирование в геологии. М: Мир, 1992. С. 247—353.
4. Зайков В. В., Шадлун Т. Н., Масленников В. В., Бортников Н. С. Сульфидная залежь Яман-Касы — древний «черный курильщик» Уральского палеоокеана// Геол. рудн. м-ний., 1995. Т. 37. С. 511—529.
5. Масленников В. В. Литологический контроль медно-колчеданных руд. Свердловск, 1991. 141 с.
6. Минералогия Урала: Элементы. Карбиды. Сульфиды. Свердловск, 1990. 390 с.
7. Минералогия Урала: Арсениды и стибниды. Теллуриды. Селениды. Фториды. Хлориды и бромиды. Свердловск: УрО РАН, 1990. С. 116—117.
8. Молошаг В. П., Буслаев Ф. П. Редкие минералы и особенности их распределения в рудах Гайского месторождения//Ежегодник-1981/Ин-т геологии и геохимии УНЦ АН СССР. Свердловск, 1982. С. 91—93.
9. Молошаг В. П., Колотов С. В., Гуляева Т. Я. Новые данные о сульфидах меди и серебра в рудах колчеданных месторождений Урала//Уральский минералогический сборник, № 5, 1995. С. 223—231.
10. Ракчеев А. Д. Новые физико-химические методы изучения минералов, горных пород и руд: Справочник. М.: Недра, 1989. 230 с.
11. Шадлун Т. Н. О колломорфных структурных руд месторождения Яман-Касы на Южном Урале/ Записки Всесоюз. минерал. об-ва, 1992. № 3. С. 151—159.
12. Barton P. B., Toulmin P. Phase relations involving sphalerite in Fe-Zn-S system//Econ Geol., 1966. V. 61. P. 815—849.
13. Hannington M. D. and Scott S. D. Hydrothermal fluids and petroleum in surface sediments of Guaymas Basin, Galf of Galifornia: a casy stydy//Canadian Mineralogist, 1988. Vol. 26. Pt. 3. P. 429—888.
14. Halbach P., Pracejus B. Geology and mineralogy of Massive Ores from Central Okinava Trough, Japan// Economic Geology, 1993. Vol. 88. P. 2210—2225.
15. Haymon R. M. Growth history of hydrothermal black smoker chimneys//Nature. V. 31. P. 695—698.
16. Juniper S. K., Jonasson I. R., Tunnicliffe V., Southward A. J. Influence of a tube-building polychaete on hydrothermal chimney mineralization//Geology, 1992, v. 20, p. 895—898.
17. Murowchick J. B., Barnes H. L. Marcasite precipitation from hydrothermal solutions//Geochim. Cosmochim. Acta. 50. P. 2615—2629.
18. Oudin E., Constantinou G. Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits//Nature, 1984. Vol. 308. P. 349—353.
19. Scott S. D. Small chimneys from Japanese Kuroko deposits//In Seminars on Seafloor Hydrothermal Systems (R. Goldie, T. J. Botrill) Geosci. Can., 1981. 8, P. 103—104.