

ТЕЛЛУРИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА: НОВЫЕ ДАННЫЕ

© 2011 г. В. П. Молошаг

Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: moloshag@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 10.11.2010 г.

Во вкрапленных рудах Тарньерского месторождения обнаружены раклиджит, алтаит, гессит, вольтинскит и цумоит, а также определены температура T и летучесть серы $\log f_{S_2}$ и теллура $\log f_{Te_2}$ в период формирования этих руд: $T = 440\text{--}455^\circ\text{C}$; $\log f_{S_2}$ от 5.5 до 5.8; $\log f_{Te_2}$ от -9.1 до 8.8. Предложены три варианта формирования теллуридной минерализации: сульфидного анатексиса, пострудных метасоматических процессов и связи с исходной концентрацией благородных металлов, теллура и других элементов в сульфидных трубах черных курильщиков. На примере месторождений Тарньерское, а также Им. 50-летия Октября и Маукское, которые испытали воздействие контактового и регионального метаморфизма на уровне гранулитовой и амфиболитовой фаций, показана возможность образования теллуридов из сульфидных расплавов, образующихся при частичном плавлении ранее образовавшихся гидротермально-осадочных колчеданных руд. На месторождениях Урала преобладает связь теллуридов с метасоматическими процессами перекристаллизации руд, часто сопровождаемыми их метаморфизмом. Отмечается пространственная обособленность теллуридов и сульфосолей.

Ключевые слова: теллуриды, сульфосоли, медноколчеданные месторождения, метаморфизм, сульфидный анатексис, метасоматоз, черные курильщики.

ВВЕДЕНИЕ

Колчеданные месторождения Урала характеризуются разнообразным набором теллуридов [12, 13, 21]. Рудные тела колчеданных месторождений или их отдельные фрагменты, в которых встречаются теллуриды, характеризуются повышенными содержаниями золота и серебра [20, 40]. На рассматриваемых месторождениях теллуриды являются одними из ведущих минералов, способных накапливать примеси золота. Основное внимание исследователей уделяется фактам находок теллуридов и сульфотеллуридов висмута и серебра, т.к. среди минералов теллура они наиболее распространены в рудах. В меньшей степени рассматривались вопросы, относящиеся к условиям формирования минералов теллура.

Ранее было показано, что теллуриды и сульфосоли способны концентрировать в себе примеси благородных металлов [19]. Данные о физико-химических условиях в парагенетических ассоциациях этих минералов открывают перспективы прогноза теллуридных минеральных форм благородных металлов. Наряду с прикладным значением названные минералы представляют генетический интерес для изучения условий переноса и накопления золота в процессах формирования руд.

Значительный объем статьи представлен материалами исследований золотосодержащих руд Тар-

ньерского месторождения, которые позволяют дополнить существующие представления об условиях формирования не только теллуридов, но и в целом золоторудной минерализации колчеданных месторождений. Месторождение залегает в породах липарит-базальтовой формации на северо-восточном контакте Помурской диоритовой интрузии [14]. Колчеданные руды и вмещающие их породы были подвержены интенсивному контактовому метаморфизму. 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. При разведке месторождения скважинами подсечены также отдельные маломощные зоны сульфидной минерализации, не связанные со сплошными сульфидными рудами, в которых отмечаются заметные содержания благородных металлов и сопутствующие им теллуриды и сульфосоли.

Целью предлагаемой статьи является обобщение новых и ранее полученных данных исследования теллуридной минерализации колчеданных месторождений Урала на основе геологических материалов и данных изучения парагенетических ассоциаций рудных минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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 самородное золото и теллуриды: гессит, алтаит, раклиджит, вольтскит, цумоит. Последний из упомянутых минералов, в том числе свинцовистый цумоит и самородный висмут, впервые обнаружены Е.В. Белогуб (ИМин УрО РАН) в ксенолитах и экзоконтактах вмещающих пород [2]. Составы упомянутых минералов приведены в табл. 1 и 2. В табл. 1 помещены полученные нами химические анализы раклиджита, цумоита, вольтскита и гессита, включая ранее опубликованные для раклиджита, а также расчет их формульных коэффициентов. Анализы алтаита приводятся в таблице 2 без расчета формульных коэффициентов, поскольку они существенно не отличаются от ранее опубликованных нами и другими исследователями многочисленных анализов из других колчеданных месторождений [12, 13, 19, 40].

Новые находки раклиджита, цумоита и вольтскита, на данный момент в рудах Тарньерского месторождения, подтверждают тенденцию сближения набора теллуридных минералов колчеданных и золоторудных месторождений. Рассматриваемые минералы обнаружены в поздних хлоритовых прожилках, гнездах, развивающихся по ороговикоманым дацитовым порфиридам. В табл. 2 приведены также анализы раклиджита из колчеданного месторождения Янахара (Yanahara), юго-западная Япония, где вмещающие породы ороговикоманы вследствие контактового метаморфизма [7, 34]. Несомненный интерес представляет находка раклиджита во вкрапленных рудах медно-цинкового колчеданного месторождения Драгсет (Dragset), Норвегия, руды которого подверглись метаморфизму в условиях зеленокаменной фации при температуре 350–450°C и давлении менее 4 кбар [35].

На основе состава минералов теллуридсодержащих руд, получены оценки физико-химических па-

раметров их формирования, таких как температура, летучесть серы и теллура. Исходными данными явились значения мольной доли серебра N_{Ag} в составе самородного золота. Поскольку теллуриды ассоциируют с пиритом и пирротинном, это позволило графическим путем определить значения температуры и летучести серы по точкам пересечения изоплет N_{Ag} с линией пирит-пирротинового равновесия на соответствующем графике [5]. Для определения летучести теллура нами учтено наличие в исследованных образцах сосуществующих алтаита и галенита. Исходя из полученных значений температуры и летучести серы, летучесть теллура определялась на основе расчета константы равновесия реакции: $2PbTe + S_2 = 2PbS + Te_2$. Для образца 1285: $N_{Ag} = 0.3703$, $\log f_{S_2} = -5.8$, $\log f_{Te_2} = -8.8$, $T = 455^\circ C$, для образца 1363: $N_{Ag} = 0.3456$, $\log f_{S_2} = -5.5$, $\log f_{Te_2} = -9.1$, $T = 440^\circ C$. Данные значения попадают в поле гессита на диаграмме $\log f_{Te_2} - T$. Расхождения значений мольной доли серебра N_{Ag} и соответствующих им значений $\log f_{Te_2}$ не выходят за пределы одной логарифмической единицы, что соответствует точности опубликованных графиков [4, 5]. Хотя выполненные оценки носят качественный характер, они показывают правомочность использования состава минералов для оценки физико-химических условий их формирования. По мере накопления исходных данных, возможен переход к более точным значениям, исходя из опубликованных формул, полученных на основе экспериментов.

Согласно опубликованным материалам Н.Н. Кускова и других исследователей, контактовым метаморфизмом охвачены все типы горных пород, слагающих рудное поле Тарньерского месторождения [14]. Дацитовые порфириды ороговикоманы по всей площади месторождения и на разведанную его глубину. В то же время диориты Помурской интрузии ороговикоманы лишь в эндоконтакте зоной шириной около 300 м. Процесс ороговикомания наложен на продукты более ранних метаморфических преобразований: оклорудного метасоматоза и зеленокаменного метаморфизма. По характеру минеральных ассоциаций роговики отвечают собственно амфиболитовой и пироксен-роговиковой ступеням метаморфизма. Наличие антофиллита в породах амфиболитовой ступени позволяет в первом приближении оценить температуру образования роговики, которая при умеренном давлении в 1 кбар и с учетом того, что они формировались в восстановительной обстановке (при избытке сульфидной серы) может изменяться от 500 до 700°C [11]. Для пироксен-роговиковой стадии температурный интервал формирования составлял 725–850°C. Таким образом, геологические данные и результаты экспериментальных исследований сульфидных минеральных ассоциаций говорят о возможности существования довольно высоких температур, отвечающих появлению сульфидных расплавов в рудном поле место-

Таблица 1. Химический состав и формульные коэффициенты теллуридов Тарньерского и других месторождений

М-ние Образец Минерал	Тарньер Т-1285 PbBi ₅ Te ₄	Тарньер Т-1363 BiTe	Тарньер Т-1363 AgBiTe ₂	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te	Тарньер Т-1363 Ag ₅ Te
Pb	13.33	11.95	2.31	2.41	2.30	0	0	0	0	0
Bi	41.03	37.85	59.53	58.09	59.10	37.28	36.72	0.02	0.01	0
Sb	0.28	0.36	0.14	0.30	0.21	0.22	0.31	0.28	0.23	0.33
Te	44.33	43.12	38.71	38.92	38.98	43.64	43.22	36.84	37.28	36.78
S	0.07	0.05	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	0.06	0.07	0.16
Au	0.01	2.21	0	0.04	0	0.03	0.01	0.06	0	0.37
Ag	1.11	4.16	0.04	0.06	0	19.40	19.15	62.95	62.1	62.53
Cu	0	0	0	0.02	0	0.20	0	0	0.01	0.04
Hg	0	0	0	0	0	0.06	0.12	0.07	0.11	0.03
Fe	0.02	0.07	0	0	0	0.14	0.04	0	0	0
Сумма	100.17	99.77	100.74	99.86	100.60	101.02	99.60	100.27	99.81	100.25
Формульные коэффициенты										
Pb	0.723	0.650	0.037	0.039	0.037	1.005	1.009	0.000	0.000	0.001
Bi	2.205	2.041	0.948	0.928	0.940	0.010	0.015	0.008	0.006	0.004
Sb	0.026	0.033	0.004	0.008	0.006	1.928	1.944	0.987	1.004	0.985
Te	3.902	3.809	1.009	1.019	1.015	0.009	0.005	0.006	0.008	0.009
S	0.025	0.014	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Au	0.001	0.002	0	0.001	0	0.001	0.000	0.001	0	0.006
Ag	0.116	0.105	0.001	0.002	0	1.014	1.019	1.996	1.978	1.980
Cu		0.016		0.001		0.018	0.003	0.001	0.001	0.002
Hg		0.001		0.002		0.002	0.003	0.001	0.002	0.001
Fe	0.004	0.014	0.002	0.002	0.002	0.014	0.004	0.001	0.002	0.005
Сумма	7.002	7.000	2.000	2.000	2.000	4.001	4.001	2.999	2.999	3.000

Таблица 1. Окончание

М-ние	Тарньер					Янахара				Драгсет		
Образец	С 1001-35.2											
Минерал	PbBi ₂ Te ₄					PbBi ₂ Te ₄				PbBi ₂ Te ₄		
Pb	12.06	11.13	12.67	11.74	11.1	12.0	12.7	11.9	13.26	13.35	13.26	
Bi	43.55	44.45	43.16	43.84	34.5	38.0	37.0	36.4	39.23	38.29	38.82	
Sb					5.1	2.2	2.6	3.5				
Te	43.65	43.89	43.93	43.90	46.3	45.4	45.5	45.8	44.63	44.96	46.30	
S	0.04	0.05	0.04	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1				
Au	0.04	0	0	0.07					0.07	0.02	0.02	
Ag	0.59	0.67	0.55	0.73	1.6	1.5	1.5	1.5	1.11	1.01	1.03	
Cu	0.41	0.48	0.40	0.33								
Hg	0.09	0.14	0.08	0.03								
Fe	0.26	0.18	0.23	0.18								
Сумма	100.69	100.66	101.05	100.88	99.6	99.7	100.1	99.9	99.64	98.22	100.51	
					Формульные коэффициенты							
Pb	0.650	0.619	0.680	0.632	0.585	0.643	0.677	0.632	0.723	0.732	0.712	
Bi	2.326	2.354	2.298	2.339	1.802	2.018	1.957	1.916	2.122	2.082	2.068	
Sb					0.457	0.201	0.236	0.316				
Te	3.818	3.813	3.831	3.837	3.960	3.949	3.941	3.949	3.953	4.004	4.039	
S	0.014	0.017	0.014	0.017	0.034	0.035	0.034	0.034	0.004	0.001	0.001	
Au	0.002			0.004								
Ag	0.061	0.069	0.057	0.075	0.162	0.154	0.154	0.153	0.197	0.181	0.180	
Cu	0.072	0.084	0.070	0.060								
Hg	0.005	0.008	0.004	0.002								
Fe	0.052	0.036	0.046	0.036								
Сумма	7.000	7.000	7.000	7.002	7.000	7.000	6.999	7.000	6.999	7.000	7.000	

Примечание к табл. 1, 2. Привязки образцов: Тарньерское месторождение. 1285 – карьер, горизонт 217 м, рудное тело 1, разведочная линия 25, ксенолит измененной силикатной породы с прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией. Образец 1363 – карьер, горизонт 187 м, северо-восточный контакт рудного тела 1.40 м на северо-запад, прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация. Образец 1490-124.2 – скважина 1490, глубина 124.2, разведочная линия 24. Образец 1001-35.2 – скважина 1001, глубина 35.2 м, разведочная линия 22, тусто-вкрапленная сульфидная минерализация. Месторождение Янахара (Yanahara), юго-западная Япония, вкрапленные колчеданные руды в ороговикованных сланцах. Месторождение Драгсет (Dragset), Норвегия; вкрапленные медно-цинковые колчеданные руды, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации ($T = 350-450^{\circ}\text{C}$, $P < 4 \text{ kbar}$). Анализы выполнены В.Г. Гмыря в Институте геологии и геохимии Уро РАН рентгеноспектральным методом на микроанализаторе SX 100 (Самса). Нулем обозначены содержания ниже чувствительности метода. Пустые клетки – анализ на указанные элементы не выполнялся.

Таблица 2. 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
1490-124.2	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
	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
1001-35.2	0.03	0.06	0	1.43	0.39	38.48		0.06	0.30	59.28	100.02
	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

рождения. Метаморфизм регрессивной стадии проявился в развитии гнезд, прожилков хлорита и карбоната, развитых на контакте рудных тел с вмещающими породами и их ксенолитами. В рудах отмечается локальное развитие мельниковит-пирита и марказита по пирротину.

На основе исследований минеральных ассоциаций золоторудного месторождения Ларга, горы Металифери (Metaliferi Mts.), горная система Южные Апусени, Румыния, предложен механизм накопления золота в рудах путем его перехода в низкотемпературные эвтектические выплавки сульфосолей и теллуридов висмута и серебра [31]. В качестве доказательства данного механизма приводится парагенезис названных минералов с самородным золотом, определения температуры формирования золотосодержащих минеральных ассоциаций 350–450°C, которые перекрываются температурами эвтектики синтетических аналогов сульфосолей и теллуридов. Для аргументации такой точки зрения, в том числе, приводятся данные экспериментальных исследований фазовых соотношений в системе Au–Pb–Bi–S, а также находки недавно открытого минерала джонассонита $AuBi_5S_4$ [28]. Последующие исследования природных халькогенидов висмута (Bi-chalcogenides; chalcogen X = S, Te, and Se) и сульфосолей висмута, выполненные с помощью локальных методов масс-спектрометрии с лазерной абляцией проб показали, что данные минералы способны концентрировать примеси золота [30]. В последнем случае агентом ремобилизации золота из сульфосо-

лей и теллуридов висмута выступает расплав металлического висмута [27, 28]. Эти процессы происходят при температуре ниже 400°C. Как считают упомянутые авторы, они имели место при формировании жильных золоторудных проявлений, связанных с гранитным массивом Хиджис, гор Западные Апусени, Румыния. Более подробно роль самородного висмута в процессе экстрагирования, извлечения золота показана на материале исследований Au–Bi–Te–S-ассоциации месторождения Мальдон, золоторудной провинции Центральная Виктория (Австралия) [27]. Данный механизм авторы аргументируют минералогическими наблюдениями с привлечением фазовых диаграмм халькогенидов висмута. Кроме того, рассмотрены также условия равновесия минералов висмута в гидротермальных условиях.

Основная часть рудовмещающих толщ на Урале подверглась региональному метаморфизму зеленокаменной и пренит-пумпеллиитовой фации. Минеральные преобразования, соответствующие физико-химическим параметрам названных фаций метаморфизма налагались на руды и окорудные метасоматиты. Руды отработанных и разрабатываемых месторождений сложены преимущественно выделенной нами халькопиритовой парагенетической ассоциацией минералов. Распределение теллуридов в пределах рудных тел, зон и месторождений определяется процессами собирательной перекристаллизации и дифференциации вещества. Основной объем залежей сплошных колчеданных руд представлен пиритом, который в тектонических

процессах разлинзования рудных тел подвергается хрупким деформациям. Теллуриды так же, 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 перераспределения. 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 [26].

Колчеданные месторождения характеризуются наличием парагенетической ассоциации теллуридов с халькопиритом, блеклыми рудами и галенитом (Гайское, Карабашское, Узельгинское, Сибайское, Дегтярское и другие). Блеклые руды составляют до 5 и более процентов от общего объема сульфидов, при концентрациях в них теллура до первых мас. %. Заметные содержания примеси теллура (десятые и сотые доли процента) обнаружены также в галените. В остальных минералах концентрации примеси теллура значительно ниже. 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. 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 голдфиллитом, окисью теллура и самородными золотом и теллуром, который был обнаружен в рудах Яман-Касинского колчеданного месторождения [13]. Теллуриды встречаются исключительно в безборнитовых рудах, чему не противоречат отдельные находки гессита в борнитовых рудах колчеданных месторождений, поскольку в описываемых случаях гессит является более поздним, наложенным, по отношению к борниту, минералом [8]. Данная тенденция прослеживается и на золоторудных месторождениях [9, 36].

В рудных телах, обогащенных теллуридами, самородное золото встречается значительно реже или вообще не наблюдается. На Сафьяновском месторождении отмечается только наличие изоморфной примеси золота в сульфотеллуриде $\text{Bi}_3\text{Te}_2\text{S}$ и гессите [19]. Самородное золото на этом месторождении обнаружено во вкрапленных медно-цинковых ру-

дах, встречающихся по периферии главной рудной зоны, а также в обогащенных галенитом и блеклыми рудами участках сплошных медно-цинковых руд. Наряду с этим, в последнее время выделения самородного золота на Сафьяновском месторождении обнаружены также в слабо измененных обломочных продуктах палеозойских “черных курильщиков” [24]. 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.

Пирротиновые руды отличаются меньшим количеством и разнообразием теллуридов, что, вероятно, связано с пониженными значениями летучести теллура. Наиболее отчетливо это тенденция проявляется для серебра и висмута. Соответственно значительно чаще отмечаются сульфиды и сульфосоли висмута и серебра. На месторождении им. 50-летия Октября, где наблюдаются висмутин и самородный висмут, теллуриды вообще не отмечались. В рудах Тарньерского месторождения встречается козалит $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$ (см. табл.) и пираргирит Ag_3SbS_3 [14]. Такая же тенденция прослеживается и на колчеданных месторождениях Рудного Алтая, где была установлена прямая зависимость распространенности сульфосолей свинца, висмута и серебра с количеством пирротина и обратная – для теллуридов [23].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обогащение золотом околорудных пород Тарньерского месторождения связано с его метаморфической ремобилизацией, вызванной термальным воздействием Помурской интрузии на сульфидные залежи (сульфидсодержащие породы). Данный механизм эффективно “срабатывает”, если сульфидные руды содержат минералы, отличающиеся низкими температурами плавления, по сравнению с порообразующими силикатами. В результате термального метаморфизма рудообразующие сульфиды могут разогреваться выше температуры плавления сульфидной эвтектики. По сравнению с рудообразующими минералами колчеданных месторождений, теллуриды и сульфосоли отличаются более низкими температурами плавления. Благодаря этому обстоятельству, такие элементы как мышьяк, сурьма, висмут, теллур, селен, таллий способны накапливаться в низкотемпературных эвтектических расплавах, из которых кристаллизуются легкоплавкие сульфосоли и теллуриды [27, 32, 40].

Согласно исследованиям, которые проводились на золоторудных и колчеданных месторождениях Австралии и Канады, появление сульфидного расплава связано с пиком метаморфизма в условиях гранулитовой или амфиболитовой фации [33].

В условиях гранулитовой фации первые порции сульфидного расплава появляются при температуре выше 800°C, если состав руд отвечает тройной эвтектике $PbS + FeS + (Zn,Fe)S$ (галенит + пирротин + сфалерит). При добавлении к данной системе халькопирита ($CuFeS_2$) эвтектический расплав $PbS + FeS + (Zn,Fe)S + CuFeS_2$ (галенит + пирротин + сфалерит + халькопирит) 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: $Asp + Py = melt + Po$ (арсенопирит + пирит = расплав + пирротин) [39]. Наличие в составе руд даже небольшого количества сульфосолей меди и свинца, теллуридов и самородных металлов (в первую очередь висмута) может обеспечить генерацию расплавов, даже в условиях отвечающих зеленосланцевой фации метаморфизма [38]. Поступление этих элементов в расплав возможно за счет очистки пирита путем его плавления в рассмотренных выше условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций. Как ведущий рудообразующий минерал колчеданных руд пирит на стадии отложения и диагенеза способен накапливать примеси **Bi, Te, Sb, As, Au, Ag** [12]. Такие расплавы способны существовать даже при условии весьма низких температур, вплоть до температуры кристаллизации висмута, составляющей 271°C. По отношению к рудным телам объем получаемых таким способом расплавов играет подчиненную роль, что обусловлено низкими содержаниями в рудах сурьмы, мышьяка, висмута, теллура и других примесей, включая благородные металлы. Это обстоятельство способствовало сохранению основного объема рудных залежей. С другой стороны, подвижность капель сульфидных и, особенно, металлических расплавов на основе висмута способствовала растворению, экстрагированию золота из рудообразующих сульфидов, что создавало предпосылки для пространственного перераспределения золота внутри рудных тел и частичного выноса его во вмещающие породы.

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), Сулительма (Норвегия) и Хемло (Канада) [32, 33, 39]. В качестве потенциальных объектов ее приложения авторы упомянутых работ относят еще около десятка крупных колчеданно-полиметаллических и медно-колчеданных месторождений, для которых возможность парциального плавления сульфидов при умеренных и высоких степенях метаморфизма основывается на опубликованных данных по физико-

химическим параметрам условий метаморфизма вмещающих пород и руд. Исходя из этих соображений и данных по условиям метаморфизма вмещающих пород месторождений уральского типа, достижение условий генерации сульфидных расплавов под воздействием контактового и регионального метаморфизма на колчеданные руды, наряду с Тарньерским, допускается для месторождений Им. 50-летия Октября и Маукского, которые отличаются широким распространением пирротиновых и пирротинсодержащих руд [14]. На обоих месторождениях выделяются прогрессивная и регрессивная стадии пострудного метаморфизма.

Рудные залежи и вмещающие породы месторождения им. 50-летия Октября подверглись интенсивному контактовому метаморфизму интрузий плаггиогранитов 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 [19].

На Маукском месторождении пострудные метаморфические изменения проходили в условиях альбит-эпидот-амфиболитовой фации. Они относятся к высокотемпературному метаморфизму линейных зон, что подтверждается общим расщеплением пород и развитием таких минералов как гранат, синие-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 мельниквит-пирита, марказита. Руды рассматриваемых месторождений по сравнению с Тарньерским обеднены благородными металлами и теллуrom, минералы которых отмечаются крайне редко.

Многие золоторудные месторождения наряду с теллуридами характеризуются богатым набором сульфосолей висмута, серебра, свинца, сурьмы, ртути, которые так же, как и теллуриды названных металлов, способны накапливать примесь золота [9, 10, 30, 38]. Основные объемы колчеданных руд Урала формировались в условиях, благоприятных для развития блеклых руд, количество которых в отдельных случаях может составлять до 5–10% от объема сульфидов. Остальные сульфосоли отмечаются эпизодически и в убывающей последовательности представлены минералами висмута, свинца, сурьмы, серебра и меди [6, 23, 25]. Блеклые руды в

качестве изоморфной примеси концентрируют висмут, теллур и серебро. Наряду с этим, в них эпизодически отмечается примесь золота, однако форма его нахождения в блеклых рудах пока не выяснена. Естественно, что наличие блеклых руд не способствовало развитию остальных весьма многочисленных (по числу минеральных видов) сульфосолей. По физико-химическим параметрам область развития блеклых руд ограничена со стороны высоких значений летучести серы энаргитом, со стороны низких – арсенопиритом [18, 20]. Для появления других сульфосолей перечисленных металлов благоприятны условия образования минеральных ассоциаций, содержащих арсенопирит (с пирротинном или без него) [20]. Исследования руд Сафьяновского и Тарньерского месторождений показали, что сульфосоли висмута наблюдаются, соответственно, в богатых медных и вкрапленных золотосодержащих рудах. В свою очередь, в рудных зонах, где не наблюдается развитие блеклых руд, намечается пространственное разделение теллуридов и остальных сульфосолей. На Сафьяновском месторождении теллуриды встречаются в прожилково-вкрапленных рудах, особенно в обогащенных медью участках (т.н. рудных столбах), представленных крутопадающими зонами развития прожилковых, гнездовых выделений халькопирита, которые сопровождаются интенсивным развитием хлорита во вмещающих породах [26]. В верхних участках богатых вкрапленных медных руд, которые по тектоническим контактам примыкают к сплошным колчеданным рудам, теллуриды не наблюдаются. Вместо них в ассоциации с халькопиритом отмечаются сульфосоли: виттихенит и айкинит, что дает основание предположить развитие данных минералов путем замещения теллуридов висмута и свинца.

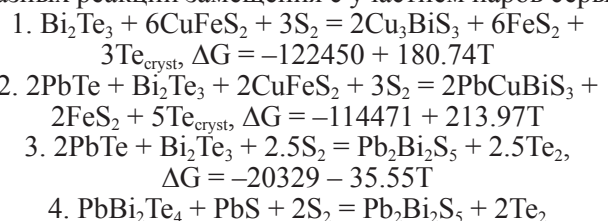
На колчеданных месторождениях блеклые руды являются одним из ключевых промежуточных “контейнеров” теллура, что обусловлено повышением степени окисления теллура до Te^{4+} в структуре блеклых руд, в отличие от теллуридов, где он присутствует в состоянии Te^{2+} [15]. Переход теллура в более высокие степени окисления Te^{4+} и Te^{6+} в оксиде теллура связан с повышением потенциала кислорода. Минеральные ассоциации сульфидов, образующиеся при повышенной летучести серы, устойчивы в гидротермальных растворах, характеризующихся повышенными значениями летучести кислорода. Эта зависимость отражается на диаграммах летучесть кислорода $\log f_{O_2}$ –кислотность раствора pH [1]. При понижении потенциала кислорода теллур практически не входит в структуру блеклых руд, подтверждением чему могут служить не только низкие содержания примеси теллура, но и парагенезис алтаита и других теллуридов с блеклыми рудами на Гайском, Узельгинском и других месторождениях. С другой стороны, переход As^{3+} и Sb^{3+} в, соответственно, As^{5+} и Sb^{5+} за счет по-

вышения потенциала кислорода способствует разрушению структуры блеклых руд, что выражается в замещении их минералами ряда энаргит–фаматинит. Этот переход, собственно, и служит границей устойчивости выделяемой нами энаргитовой субфации [18].

Влиянием окислительно-восстановительного потенциала, очевидно, обусловлено практическое отсутствие теллуридов в современных подводных сульфидных постройках, вместо которых отмечаются сульфосоли, да и то в единичных случаях [3, 16, 17]. С другой стороны, в слабо метаморфизованных колчеданных рудах открыты фрагменты гидротермальных построек в виде ископаемых труб черных курильщиков, которые содержат богатый набор теллуридов, голдфиллит и, реже, самородный теллур и оксид теллура [13]. Современные черные курильщики образуются в условиях смешивания горячих гидротермальных растворов с холодными, относительно богатыми кислородом придонными водами, что не способствует переходу теллура в восстановленные формы Te^{2+} в теллуридах и самородного теллура Te^0 . Образование теллуридов происходит в восстановительных условиях при диagenезе, литификации рудовмещающих толщ. Условия седиментогенеза и гальмиролиза палеогидротермальных полей подробно рассмотрены в монографии [12].

Пирротиновые руды отличаются меньшим количеством теллуридов, что, вероятно, связано с пониженными значениями летучести теллура, вследствие чего ведущими минеральными формами нахождения серебра, свинца, висмута являются их сульфиды и сульфосоли. В этом отношении представляет интерес месторождение им. 50-летия Октября, где в условиях пирротиновой фации, при отсутствии теллуридов висмута, установлены висмутин и самородный висмут, а также пираргирит Ag_3SbS_3 [14]. Пространственная разобщенность теллуридов и сульфосолей намечается и в рудах Тарньерского месторождения, где достоверно обнаружен пока один из представителей сульфосолей – козалит $Pb_2Bi_2S_5$ [19]. Во всяком случае, в тех образцах, где отмечается козалит, теллуриды не наблюдаются.

Упомянутые сульфосоли являются продуктами замещения теллуридов висмута и свинца. Реакции их образования можно представить в виде твердофазных реакций замещения с участием паров серы.



Возможность данных реакций подтверждается оценкой их свободной энергии Гиббса (ΔG). Не-

смотря на то, что мы не располагаем данными непосредственных измерений термодинамических характеристик сульфосолей, свободную энергию их образования ΔG° можно получить с помощью метода смешанных компонентов. Он основан на суммировании свободных энергий сульфидов составляющих данных минералов $\Delta G^\circ = (N_a \Delta G_a^\circ + \dots + N_i \Delta G_i^\circ)$ и выражения свободной энергии их смешения $\Delta G_m = (1.2 \pm 0.8) (N_i RT \ln N_i)$, где N_a, \dots, N_i – мольные доли сульфидов крайних членов a, \dots, i . “Сборка” виттихенита, айкинита и козалита осуществлялась из следующих составляющих: виттихенит – $\text{Cu}_3\text{BiS}_3 = 1.5\text{Cu}_2\text{S} + 0.5\text{Bi}_2\text{S}_3$; айкинит – $\text{PbCuBiS}_3 = \text{PbS} + 0.5\text{Cu}_2\text{S} + 0.5\text{Bi}_2\text{S}_3$; козалит – $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5 = 2\text{PbS} + \text{Bi}_2\text{S}_3$, поскольку для них существуют надежные оценки термодинамических данных [5]. В последнем случае, реакция 3, теллур освобождается в виде газообразного соединения Te_2 .

Каждая из приведенных первых трех реакций содержит только одно из соединений, для которого свободная энергия Гиббса получена на основе, по своей сути, полуколичественного метода смешанных компонентов. Возможна также и реакция 4. Однако расчетные данные по ней не приводятся, поскольку неопределенность значений ΔG возрастает в большей степени, чем для первых трех реакций по причине отсутствия экспериментально определенных термодинамических характеристик не только козалита, но также и раклиджита. Возможность такой реакции подтверждается пока только минералогическими наблюдениями. Они могут приводить к появлению кристаллического теллура Te_{crist} в поздних низкотемпературных образованиях ранее выделенного природного типа богатых медных руд Сафьяновского месторождения (рудные столбы), реакции 1, 2. Эти две реакции подтверждаются находками самородного теллура в рудах не только Сафьяновского, но и других месторождений [13]. Образование сульфосолей возможно и без появления самородного теллура, примером чему может служить находка козалита в колчеданных рудах Тарньерского месторождения, которые были подвергнуты интенсивному термальному метаморфизму.

В зависимости от соотношения давления (летучести) паров теллура и серы в конкретной геологической обстановке, рассмотренные реакции могут протекать и в обратном направлении. Об этом свидетельствуют наблюдения реакционных взаимоотношений теллуридов и сульфосолей [30, 31]. Выборочный анализ опубликованных данных по минеральному составу золоторудных месторождений, где наиболее часто отмечаются данные минералы, представленные в виде классических таблиц минерал–стадия в большинстве случаев показывает наличие тенденции разобшения теллуридов и сульфосолей свинца, висмута серебра. Значительно реже наблюдается их совмещение во времени и про-

странстве [37]. Из этого следует, что преобладающее развитие теллуридов или сульфосолей определяется соотношением давления паров серы и теллура. Совмещение названных групп минералов, очевидно, обусловлено равновесным соотношением давления паров серы и теллура. Такой подход не противоречит привлечению классических диаграмм состав–температура халькогенидных (включающих простые и сложные соединения серы, селена и теллура с металлами) и близких им по геохимии и минералогии систем, включающих соединения халькогенидов металлов с мышьяком и сурьмой. На основе этих диаграмм и данных по условиям равновесия минеральных ассоциаций силикатных пород упомянутыми выше авторами разработана концепция сульфидного анатексиса. Привлечение экспериментально разработанных данных по минералогической термометрии сульфидов и теллуридов с учетом давления паров серы и теллура позволит дополнить сведения о физико-химических условиях формирования минеральных парагенезисов сульфидных руд, которые испытали частичное (возможно и полное) плавление в условиях высокотемпературного контактного или регионального метаморфизма.

В последнее время на Сафьяновском месторождении нами обнаружена ассоциация сурьмяных, свинцово-серебряных и серебряных сульфосолей, в полиметаллической гнездовой и прожилковой барит-сульфидной минерализации, отличающейся сложным строением. Она приурочена к проявленной на горизонтах 110–130 тектонической зоне, которая пересекает южный край главного рудного тела № 1 и частично выходит за его пределы во вкрапленные медные руды. Рудное тело сложено сплошными сульфидными медными и медно-цинковыми рудами, которые характеризуются тонкозернистым строением, слабо выраженной раскристаллизацией зерен сульфидов, а также наличием колломорфных структур. Такие руды отличаются пористым строением и способностью к разрушению за счет быстро развивающихся процессов окисления. Их можно считать слабо измененными аналогами первичных руд, аналогичных описанным на Блявинском, Яман-Касинском и других колчеданных месторождениях Южного Урала [12].

В прожилках и гнездах барит-полиметаллической минерализации макроскопически выделяются внешняя, промежуточная и внутренняя зоны. Облик внешней зоны определяется зернами и агрегатами сфалерита зернистого и почковидного строения, которые пересекаются тонкими прожилками барита. В промежуточной зоне отмечаются зерна и кристаллы пирита. Внутренняя зона сложена крупнозернистым баритом. Сульфосоли представлены буланжеритом $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$, Zn-фрейбергитом $(\text{Cu}, \text{Ag})_{10}\text{Zn}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, пираргиритом Ag_3SbS_3 , полибазитом $\text{Ag}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$, диафоритом $\text{Ag}_3\text{Pb}_2\text{Sb}_3\text{S}_8$ и фама-

Таблица 3. Химический состав сурьмяных сульфосолей меди и серебра (мас. %), из промежуточной зоны сульфидно-баритовой жилы Сафьяновского месторождения, по [22]

№ 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. Жирным курсивом выделены содержания элементов, находящиеся в пределах погрешности ($<2\sigma$) энергодисперсионного микроанализа. Электронно-зондовый микроанализ выполнен в Институте минералогии УрО РАН на электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Link INCA Energy.

тинитом Cu_3SbS_4 [21]. Буланжерит развит во внешней и промежуточной зонах в виде включений в галените. Остальные сульфосоли развиты в промежуточной зоне. Химический состав сурьмяных сульфосолей меди и серебра приводится в табл. 3.

Минеральный состав барит-сульфидных гнезд, жил Сафьяновского месторождения обнаруживает черты сходства с современными проявлениями подводной гидротермальной минерализации, связанной с сульфидсодержащими трубообразными постройками Венского леса (бассейн Манус) и штокверка сульфидно-баритовых жил Белой Церкви (бассейн Лау) [16, 3]. Наряду с отмеченным набором сульфосолей заслуживают внимания повышенные содержания примесей мышьяка в пирите из внутренней зоны развития барит-сульфидной минерализации, что свидетельствует о потенциальной возможности накопления, точнее связывания золота в пирите [22]. Зоны развития барит-сульфидной минерализации могли служить одним из источников “питания” подводных гидротермальных построек, в том числе и таких эффективных их проявлений как сульфидные трубы древних черных курильщиков, описанных в монографиях [12, 13]. Как указывалось выше, превалирование теллуридной минеральной формы проявления золота, серебра, висмута и других металлов обусловлено замещением сульфосолей теллуридами, а также очисткой пирита от примесей при последующих процессах диагенеза и метаморфизма. Возвращаясь к Сафьяновскому месторождению, отметим, что присутствие тонкозернистых, субмикроскопических выделений сульфосолей свидетельствует о незавершенности процессов метаморфических преобразований сплошных сульфидных медных и медно-цинковых руд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В рудах колчеданных месторождений Урала возможны, по крайней мере, три варианта формирования теллуридной минерализации: сульфидного анатексиса, пострудных метасоматических процессов и в связи с исходным накоплением вещества (благородных металлов, теллура и других элементов) в сульфидных трубах.

2. На примере месторождений Тарньерского, а также Им. 50-летия Октября и Маукского, которые испытали воздействие контактового и регионального метаморфизма на уровне гранулитовой и амфиболитовой фаций, показана возможность образования теллуридов из сульфидных расплавов, образующихся при частичном плавлении ранее образовавшихся гидротермально-осадочных колчеданных руд.

3. На большей части месторождений Урала развитие теллуридов связано с пострудными метасоматическими процессами перекристаллизации колчеданных руд.

4. В рудах рассмотренных колчеданных месторождений намечается пространственная обособленность теллуридов и сульфосолей.

Исследования выполнены при финансовой поддержке УрО РАН, проект 09-Т-5-1011 и РФФИ № 01201174096.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барнс Х.Л. Растворимость рудных минералов // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 328–369.

2. Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А. Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Тарньерского медно-цинкового колчеданного месторождения (Северный Урал) // Записки ВМО. 2010. № 6. С. 82–93.
3. Бортников Н.С., Викентьев И.В. Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в Мировом океане // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47, № 1. С. 16–50.
4. Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д. и др. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия // Геология рудных месторождений. 1988. Т. 30, № 2. С. 49–61.
5. Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 576 с.
6. Демин Ю.И., Сергеева Нат. Е. Новые данные о висмутовой минерализации на Новоберезовском колчеданно-полиметаллическом месторождении (Рудный Алтай) // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276, № 2. С. 425–428.
7. Канехира К., Татсуми Т. Обзор пластовых медно-колчеданных месторождений Японии // Вулканизм и рудообразование. М.: Мир, 1973. С. 53–72.
8. Качаловская В.М., Хромова М.М. О бетехтините, гессите и штрмейерите из борнитовых руд месторождения Уруп // Геология рудных месторождений. 1970. Т. 10, № 1. С. 93–97.
9. 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.
10. Коваленкер В.А., Сафонов Ю.Г., Наумов В.Б., Русинов В.Л. Эпитермальное золото-теллуридное месторождение Кочбулак (Узбекистан) // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39, № 2. С. 127–152.
11. Маракушев А.А. Термодинамика метаморфической гидратации минералов. М.: Наука, 1968. 200 с.
12. Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
13. Масленникова С.П., Масленников В.В. Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков”. Екатеринбург–Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
14. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение / В.А. Прокин, Ф.П. Буслаев, М.И. Исмагилов и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 240 с.
15. Мозгова Н.Н., Бородаев Ю.С., Ефимов А.В. и др. Минералы серебра в океанических гидротермальных образованиях (бассейны Манус и Вудларк, район Папуа-Новая Гвинея) // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35, № 4. С. 333–343.
16. Мозгова Н.Н., Краснов С.Г., Бородаев Ю.С. и др. Строение, минеральные ассоциации и благородные металлы океанской рудной постройки Мир гидротермального поля ТАГ (Срединно-Атлантический хребет) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40, № 3. С. 256–277.
17. Мозгова Н.Н., Цепин А.И. Блеклые руды. М.: Наука, 1983. 280 с.
18. Молошаг В.П. Использование состава минералов для оценки физико-химических условий образования колчеданных руд Урала // Литосфера. 2009. № 2. С. 28–40.
19. Молошаг В.П., Викентьев И.В. Благородные металлы в рудах колчеданных месторождений Урала // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 810–839.
20. Молошаг В.П., Грабежьев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я. Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Литосфера. 2004. № 2. С. 30–51.
21. Молошаг В.П., Грабежьев А.И., Гуляева Т.Я. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Записки ВМО. 2002. Ч. 131, № 5. С. 40–54.
22. 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.
23. Покровская И.В. Минералогия и условия образования полиметаллических месторождений (Ленингорский район Рудного Алтая). Алма-Ата: Наука, 1982. 128 с.
24. Сафина Н.П., Масленников В.В. Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: УрО РАН, 2009. 260 с.
25. Юдовская М.А., Брызгалов И.А., Еремин Н.И. и др. Новые данные о сурьмяно-висмутовой минерализации в рудах Малеевского месторождения (Рудный Алтай) // Вестник МГУ. 1992. Сер. 4. Геология. № 2. С. 53–65.
26. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33, № 4. С. 47–58.
27. Ciobanu C. L., Birch W. D., Cook N. J. et al. Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia // Lithos. 2010. V. 116. P. 1–17.
28. 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 // Mineral. Petrol. 2006. V. 87. P. 351–384.
29. Ciobanu C.L., Cook N.J., Pring A. et al. Another look at nagyágit from the type locality, Săcărîmb, Romania: Replacement, chemical variation and petrogenetic implications // Mineral. Petrol. 2008. V. 93. P. 273–307.
30. Ciobanu C.L., Cook N.J., Pring A., et al. “Invisible gold” in bismuth chalcogenides // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 1970–1999.
31. Cook N.J., Ciobanu C.L. Bismuth tellurides and sulfosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic // Mineral. Mag. 2004. V. 68. P. 301–321.
32. Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism // Can. Mineral. 2002. V. 40. P. 1–18.
33. Frost B.R., Swapp S.M., Gregory R.W. Prolonged existence of sulfide melt in the Broken Hill orebody, New South-Wales, Australia // Can. Mineral. 2005. V. 43. P. 479–493.
34. Kase K., Kusachi I., Kishi S. Rucklidgeite solid-solution in the Yanahara deposit, Japan // Can. Mineral. 1993. V. 31. P. 99–104.

35. *McQueen K.G.* Tellurides in metamorphosed stringer ore from the Dragset deposit, South Trondelag, Norway // *N. Jb. Miner. Mh.* 1990. H. 5. P. 205–216.
36. *Plotinskaya O.Yu., Kovalenker V.A., Seltmann R., Stanley C.J.* Te and Se mineralogy of the high-sulfidation Kochbulak and Karagach epithermal gold telluride deposits (Kurama Ridge, Middle Tien Shan, Uzbekistan) // *Mineral. Petrol.* 2006. V. 87. P. 187–207.
37. *Tomkins A.G.* Three mechanisms of ore re-mobilisation during amphibolites facies metamorphism at the Montauban Zn-Pb-Au-Ag deposit // *Mineral. Depos.* 2007. V. 42. P. 627–637.
38. *Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Frost B.R.* On the initiation of metamorphic sulfide anatexis // *J. Petrol.* 2007. V. 48, № 3. P. 511–535.
39. *Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Zaleski E.* The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolites facies metamorphism and deformation // *Econ. Geol.* 2004. V. 99, № 6. P. 1063–1084.
40. *Vikentyev I.V.* Precious metal and telluride mineralogy of large volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Urals // *Mineral. Petrol.* 2006. V. 87. P. 305–326.

Рецензент И.В. Викентьев

Telluride mineralization of massive sulfide deposits in the Urals: A new data

V. P. Moloshag

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The new finds of rucklidgeite, altaite, hessite, volynskite and tsumoite in the impregnated ores of the Tarnyetskoye deposit have been made and also a temperature T and volatility of sulphur $\log f_{S_2}$ and tellurium $\log f_{Te_2}$ of a mineralization period have been determined: $T = 440\text{--}455^\circ\text{C}$; $\log f_{S_2}$ are from -5.5 to -5.8 ; $\log f_{Te_2}$ are from -9.1 to -8.8 . Three version of telluride formation are suggested: metamorphic sulfide anatexis, post-ore metasomatic processes and connection with initial concentration of precious metals, tellurium and other elements in sulfide tubes of black smokers. On an example of the Tarnyetskoye deposit and also 50 Let Oktyabrya and Maukskoye deposits which have been influenced by contact and regional metamorphism at the level of granulite and amphibolite facies were demonstrated an opportunity of telluride formation by fractional melting of the earlier hydrothermal-sedimentary sulfide ore. **The tellurides of the Ural's sulfide deposits connected to metasomatic processes of ore recrystallization.** It will be noted the spatial separation of tellurides and sulphosalts occurrences.

Key words: *tellurides, sulphosalts, massive sulfide deposits, metamorphism, sulfide anatexis, metasomatism, black smokers.*