

УДК 553.43 : 549.3

Н.И. Еремин, Н.Е. Сергеева, А.Л. Дергачев

ТИПОМОРФИЗМ РЕДКИХ МИНЕРАЛОВ КОЛЧЕДАНЫХ РУД И ИХ ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ТРЕНД

На основе главных классификационных признаков для колчеданных месторождений — составе рудосносных вулканогенных формаций и руд в группе вулканогенных колчеданных месторождений — выделяют: 1) медно- и медно-цинково-колчеданные месторождения в недифференцированных базальтоидных (офиолитовых) формациях и 2) медно-цинково-колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения в бимодальных базальт-риолитовых и последовательно дифференцированных базальт-андезит-дацит-риолитовых формациях. К первой группе относятся месторождения типов кипрского и бесси, ко второй — куроко и уральского [4].

Геохимическая специализация месторождений типов **кипрского и бесси** с их относительно небольшими запасами и различной геодинамической обстановкой формирования определяется в целом невысоким средним содержанием промышленных металлов в рудах при преобладании Cu над Zn (Cu 2,05%, Zn 0,72%, [9]), резко пониженными концентрациями Pb и Ag, но повышенными — Co и Ni, а также As и Sb.

Основные минералы-носители Co и Ni в рудах — пирит и пирротин, причем Co охотнее входит в решетку дисульфида, а Ni — моносульфида Fe. Очень многим месторождениям свойственна заметная концентрация Co и Ni в пирите (например, на месторождении Бесси содержание Co в пирите изменяется от 0,0015 до 0,015 мас.% при отношении Co:Ni=1:1, до 1:30). На месторождении Раул концентрация Co в пирите достигает 0,095 мас.%, Ni — 0,11 мас.%.

Несмотря на повышенное содержание Co и Ni в сульфидах железа в рудах месторождений кипрского и бесси типов, собственные минералы этих металлов встречаются редко. Среди них преобладают сульфиды, арсениды и сульфоарсениды. Наиболее распространены пентландит и кобальтпентландит (табл. 1).

В отличие от медно-никелевых месторождений с присущим им низкокобальтовым пентландитом в рудах колчеданных месторождений развита в основном высококобальтовая разновидность этого минерала. Пример объекта с проявлением такой минерализации — месторождение Шимокава (тип бесси), расположенное в северной части зоны Хидака (о. Хоккайдо, Япония). Здесь кобальт-пентландит встречается в пирит-халькопирит-пирротиновой руде и чаще приурочен к пирротину. Этот парагенезис дополняется кобальтовым макинавитом и кобальтином. В рудах месторождения установлен еще один кобальтовый минерал, названный “шимокава-X” и имеющий состав, близкий к $(Co, Fe)_3AsS_3$.

Ряд месторождений Южного Урала, расположенных в Присакмарской офиолитовой зоне (Дергамышское, Ивановское, Ишкининское), относятся к кипрскому типу [6]. В их рудах наряду с преобладающими пиритом, халькопиритом, магнетитом и пирротином содержится целый набор собственных минералов Co и Ni: кобальтин, глаукоцит, никелин, линнеит, виоларит, зигенит, пентландит, кобальтпентландит.

Еще один пример месторождений кипрского типа — Пышминско-Ключевское месторождение (Средний Урал), расположенное в западной части Восточно-Уральского поднятия [8]. Главные минералы руд: пирит, пирротин, халькопирит, магнетит, кубанит. Содержание Co в пирите варьирует от 0,02 до 0,16, в магнетите — от 0,12 до 0,50, в халькопирите — от 0,09 до 0,38 мас.%. Основными минералами Co и Ni являются пентландит, макинавит и кобальтовый макинавит, реже зигенит. Зафиксированы также единичные находки линнеита, миллерита, никелина и бравоита. Кобальтпентландит развит в пирит-пирротиновых рудах, где образует изометричные выделения и жилки. Содержание Co меняется от 0,2—1 мас.% в пентландите до 30 мас.% в кобальтпентландите. Макинавит появляется в пирит-халькопиритовых рудах, где его количество достигает 1%; содержание Co в кобальтовом макинавите составляет 6—7 мас.%. Зигенит образует единичные зерна размером 0,01—0,02 мм или их скопления в халькопирите; содержание в нем Ni составляет около 20 мас.%, Co — 30 мас.%. Мелонит представлен изометричными или слегка вытянутыми включениями размером тысячные и сотые доли миллиметра в пирит-халькопиритовой рудной массе. Иногда в ассоциации с мелонитом обнаруживается теллурид Ag — гессит. Проведенный микрозондовый анализ показал, что в мелоните помимо обычных изоморфных примесей Fe и Co иногда содержится Pd [6].

Возможные докембрийские аналоги месторождений кипрского типа — протерозойские месторождения рудного района Оутокумпу—Вуонос и Керетти (Финляндия), в рудах которых также отмечается кобальтпентландит.

Руды этих месторождений состоят в основном из пирита, пирротина, халькопирита, сфалерита. Из второстепенных и редких минералов встречаются кубанит, магнетит, макинавит, станнин, кобальтин, герсдорфит, зигенит, виоларит и специфические минералы Cr и V (хромит, хромовый диопсид, хромовый турмалин, хромовый тремолит, уваровит, фуксит, эсколаит (Cr_2O_3) , вуорелайненит $(Mn, Fe)(V, Cr)_2O_4$, ка-

Редкие минералы в месторождениях кипрского и бесси типов и их докембрийских аналогов

Минерал	Формула	Минерал	Формула
Сульфиды		Гаухекорнит	$Ni_9Bi(Sb, Bi)S_8$
Пентландит	$(Ni, Fe)_9S_8$	Арсениды и сульфоарсениды	
Кобальтпентландит	$(Co, Fe, Ni)_9S_8$	Никелин	$NiAs$
Кобальтмакиनावит	$(Co, Fe, Ni)_{1+x}S$	Маухерит	$Ni_{11}As_8$
Линнеит	Co_3S_4	Раммельсбергит	$NiAs_2$
Миллерит	NiS	Круговит	$NiAs_2$
Зигенит	$(Ni, Co)_3S_4$	Сафлорит	$(Co, Fe)As_2$
Виоларит	$FeNi_2S_4$	Хлоантит	$(Ni, Co)As_3$
Бравойт	$(Ni, Fe)S_2$	Кобальтин	$CoAsS$
Карролит	$Cu(Co, Ni)_7S_4$	Глаукодот	$(Co, Fe)AsS$
Катгьерит	CoS_2	Герсдорфит	$NiAsS$
Антимониды и сульфоантимониды		Шимокава-Х	$(CoFe)_3AsS_3$
Брейтгауптит	$NiSb$	Теллуриды	
Ульманит	$NiSbS$	Мелонит	$NiTe_2$
Костибит	$CoSbS$	Арсенаты	
Виллиамит	$(Co, Ni)SbS$	Эритрин	$Co_3(AsO_4) \cdot 8H_2O$

релианит (V_2O_5). Кобальтпентландит, как и в случае фанерозойских месторождений, приурочен к пирротину и находится в нем в виде неправильных, пламенеvidных или пластинчатых выделений. Размер зерен — от сотых долей миллиметра до 0,1 мм, редко до 0,2 мм. В рудах месторождения Вуонос его количество достигает 0,5%. Помимо кобальтпентландита установлен сербросодержащий пентландит.

Пентландит в качестве редкого минерала встречается и в рудах серноколчеданных месторождений Карелии; при этом его состав по соотношению Ni, Co, Fe меняется в широком диапазоне. Обычно это высококобальтовый пентландит, образующий мелкие пластинчатые, пламенеvidные, каплевидные, реже изометричные выделения в пирротине. Иногда в ассоциации с этим пентландитом обнаруживается макиनावит, также с высоким содержанием Co, изредка отмечается мелонит. Пентландит с низким содержанием Co встречается реже, например он образует прожилковидные выделения размером до 1 мм в пирротиновой руде Парандовского месторождения. Здесь в ассоциации с пентландитом встречен хромит.

Таким образом, видно, что кобальтпентландит чаще всего приурочен к пирротину и, как показывает структура его выделений, является продуктом распада твердого раствора. Состав кобальтпентландита меняется в широких пределах на разных месторождениях (рис. 1). В то же время для большинства объектов при меняющемся содержании Co отношение Ni:Fe в нем остается постоянным и близким к 1. Исключение составляют более молодые объекты — современные

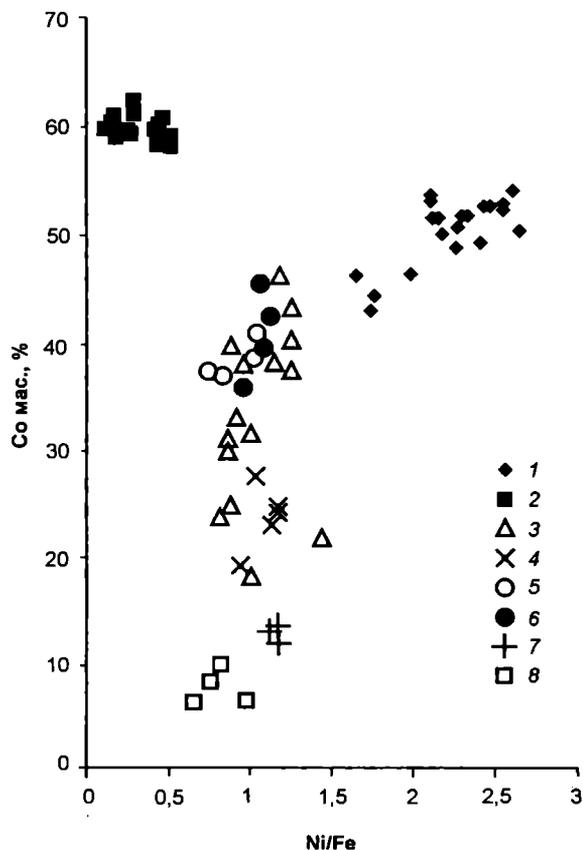


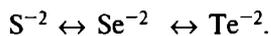
Рис. 1. Состав кобальтпентландита в различных колчеданных месторождениях вулканической ассоциации: 1—8 — месторождения: 1 — поле Логачев (САХ), 2 — Шимокава (Япония), 3 — Пышминско-Ключевское (Урал), 4 — Парандовское, 5 — Хаугаваарское (Карелия), 6 — Вуонос, 7 — Керетти (Финляндия), 8 — Озерки (Рудный Алтай)

сульфидные руды в Мировом океане [14] и месторождение Шимокава. Состав кобальтпентландита, вероятно, прямо связан с концентрацией Co в рудах, в первую очередь в пирите. Предполагается, что при преобладающем метаморфогенном преобразовании пирита в пирротин часть избыточного Co в результате распада твердого раствора образует собственный минерал — кобальтпентландит. Возможно, что при метаморфической переработке ультраосновных пород, находящихся в непосредственной близости прямо с рудными телами, происходит вынос из серпентинитов Co, Ni, Cr и дополнительное обогащение руд этими элементами [6].

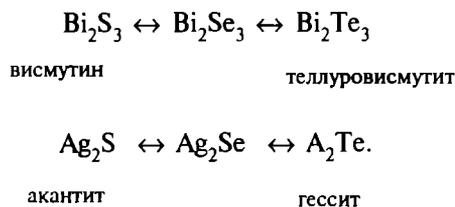
В месторождениях типов уральского и куроко минералы Co и Ni встречаются гораздо реже.

Месторождения уральского типа сложены преимущественно медно-цинковыми рудами. Содержание Cu и Zn в них колеблется от долей процента до 10 и 13,5% соответственно (в среднем Cu 1,68%, Zn 3,05%, Pb 0,14% [9]). Руды характеризуются повышенным содержанием некоторых элементов-примесей: Se, Te, Ge, Tl, Sn. Если в недифференцированных серноколчеданных рудах Se концентрируется в пирите, то в дифференцированных медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных рудах количество Se в пирите уменьшается, он в изоморфной форме перехо-

дит в халькопирит и сфалерит [1]. Среднее содержание Se в халькопирите Сибайского месторождения (Южный Урал) составляет 140 г/т, в месторождениях Среднего Урала достигает 520 г/т; в рудах месторождения Озерное (Южный Урал) — 440 г/т. Собственно селеновые минералы встречаются крайне редко. В отличие от Se Te практически не входит в виде изоморфной примеси в сульфиды и не рассеивается в них, как это происходит с селеном, а дает самостоятельные минералы. Если руды содержат Se и Te, то помимо теллурида Ag (гессита) появляются теллуриды и сульфотеллуриды висмута. В.С. Урусов [12] полагает, что Se (эффективный радиус его аниона промежуточный между S и Te) является своеобразным “промежуточным агентом”, изоморфно замещающим S с расширением параметров решетки, что позволяет войти в нее более крупному аниону теллура; последнему трудно войти в структуру сульфидов непосредственно из-за значительной разницы в размерах атомов S и Te.



Эта схема ступенчатого метаморфизма может иллюстрировать образование теллуровисмутита и гессита:



Минералы Te развиты в колчеданных рудах весьма неравномерно. Их появление связано, по-видимому, с несколькими причинами: повышенным содержанием Te в гидротермальных растворах и степенью окисленности H_2Te (или HTe), что имеет важное значение для формирования теллуридно-акцессорной минерализации, например, в рудах колчеданных месторождений Урала. Восстановительные условия гидротерм позволяют сохраниться избыточному количеству восстановленных форм Te, необходимых для формирования различных теллуридов. В условиях дефицита этих форм формируется лишь теллурид Ag (обычно гессит), обладающий наибольшим сродством к Te [7]. Для образования теллуридов необходимо также повышенное содержание элементов, с которыми Te охотно образует соединения, это так называемые видообразующие элементы: Bi, Au, Ag, Pb, Hg.

Для месторождений уральского типа характерны разнообразные теллуриды, что хорошо видно на примере месторождений Урала: Гайского, Сибайского, Яман-Касы (D—S) и других колчеданосных провинций мира (Турция, Болгария (K_2), Норвегия (O₁) (табл. 2).

Так, в рудах Гайского месторождения теллуриды представлены алтаитом, гесситом, сульфотеллуридом Ag, а также колорадитом и креннеритом [3]. Все эти

минералы, как правило, образуют мелкие выделения, размеры которых не превышают сотые доли миллиметра. Они имеют изометричную, реже удлиненную форму. Почти все они встречаются в рудах пирит-халькопиритового или сфалерит-халькопирит-пиритового состава. Исключение составляет лишь сульфотеллурид серебра, содержащийся в борнитовых рудах. Другой пример — месторождение Яман-Касы, руды которого отличаются аномально высоким содержанием Te (204 г/т). Здесь встречается самородный теллур, а теллуриды представлены весьма широким списком минералов (гессит, шютцит, петцит, сивланит, вольтскит, эмпрессит, алтаит, фробергит, колородит, голдфилдит, теллуровисмутит).

Другая особенность минерального состава медно-колчеданных руд месторождений уральского типа — распространение в них сульфидов Sn, Ge, V. В месторождениях Урала они представлены станнином, изоструктурными с ним станноидитом, моусонитом и близкими к ним по структуре германитом и реньеритом, а также колуситом и арсеносульванитом.

Вулканогенные колчеданные месторождения — существенный источник Au и Ag. Наиболее четкая закономерность прослеживается в распределении Ag в ряду месторождений различного типа. Медно-колчеданные месторождения кипрского типа характеризуются наименьшим содержанием Ag, корреспондируя низкому содержанию Pb и отсутствию галенита. В медно-колчеданных и медно-цинково-колчеданных рудах месторождений уральского типа содержание Ag несколько выше. Наиболее высоким содержанием серебра отмечаются колчеданно-полиметаллические руды месторождений типа **куроко** с высоким содержанием Pb и галенитом — одним из главных рудообразующих минералов (в среднем Cu 0,55%; Zn 4,20%; Pb 1,02%; Ag 93 г/т [8]).

В самородном виде Ag и Au присутствуют в месторождениях всех типов. Отдельные сульфиды этих металлов и сульфосоли Ag проявляются лишь в разновозрастных месторождениях уральского типа, достигая максимального разнообразия в месторождениях типа куроко. В месторождениях этой группы палеозойского возраста среди широкого спектра теллуридов различных металлов присутствуют также теллуриды Ag и Au; в молодых (миоценовых) месторождениях Куроко (Япония), как и в современных гидротермальных отложениях, теллуриды вообще почти не встречаются.

В составе каждой группы колчеданно-полиметаллических месторождений из разных регионов и разного возраста, относящихся к типу куроко, выявляется одна и та же закономерность: в среднем наиболее обогащены Ag более свинцовистые месторождения, они характеризуются максимальными значениями отношения Ag:Au (табл. 3), но главным образом за счет Ag; поведение Au не столь однозначно, как Ag [5].

Неравномерное распределение Ag и Au проявлено в контурах индивидуальных залежей миоценовых

Таблица 2

Редкие минералы в рудах колчеданных месторождений уральского типа

Минерал	Химический состав (теоретический)	Минерал	Химический состав (теоретический)
Самородные элементы		Арсениды, антимониды, теллуриды	
Самородное серебро	Ag	Арсенопирит	FeAsS
Самородное золото	Au	Кобальтин	CoAsS
Электрум	(Au, Ag)	Брейтгауптит	NiSb
Гиленит	(Ag, Bi)	Ульманит	NiSbS
Самородное теллур	Te	Фаматинит	Cu ₃ SbS ₄
Сульфиды		Энаргит	Cu ₃ AsS ₄
Аргентит (акантит)	Ag ₂ S	Гессит	Ag ₂ Te
Штроемейерит	AgCuS	Эмпрессит	AgTe
Ялпаит	Ag ₃ CuS ₂	Калаверит	AuTe ₂
Макинстириит	(Ag, Cu) ₂ S	Креннерит	AuTe ₂
Висмутин	Bi ₂ S ₃	Петцит	Ag ₃ AuTe ₂
Гриноцит	CdS	Сильванит	(Au, Ag) ₂ Te ₄
Киноварь	HgS	Бенлеонардит	Ag ₈ (Sb, As)Te ₇ S ₈
Берндтит	SnS ₂	Алтаит	PbTe
Моусонит	Cu ₁₆ Fe ₂ SnS ₈	Фробергит	FeTe ₂
Станноидит	Cu ₈ (Fe, Zn) ₃ Sn ₂ S ₁₂	Голдфилдит	Cu ₁₂ (Te, Sb, As) ₄ S ₁₃
Реньерит	(Cu, Zn) ₁₁ (Ge, As) ₂ Fe ₄ S ₁₆	Теллуровисмутит	Bi ₂ Te ₃
Германит	Cu ₂₆ Fe ₄ Ge ₄ S ₂₂	Тетрадимит	Bi ₂ Te ₂ S
Колусит	Cu ₂₆ V ₂ (As, Sn, Sb) ₆ S ₃₂	Волынский	AgBiTe ₂
Арсеносульванит	Cu ₃ (AsV)S ₄		
Сульфосоли			
Прустит	Ag ₃ AsS ₃	Джемсонит	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄
Пираргирит	Ag ₃ SbS ₃	Иорданит	Pb ₁₄ (As, Sb) ₆ S ₂₃
Фрейбергит	(Ag, Cu, Fe, Zn) ₁₂ (Sb, As) ₄ S ₁₃	Менегенит	Pb ₁₄ CuSb ₇ S ₂₄
		Бурнонит	PbCuSbS ₃
		Буланжерит	Pb ₃ Sb ₄ S ₁₁

Таблица 3

Группировка месторождений типа куроко по соотношениям в их рудах Ag, Au, Cu и Pb

Рудный район	Группа (число месторождений)	Pb/Cu *	Ag, (Bi), г/т	Au, г/т	Ag/Au
Хокуроку (Япония)	I (5)	5—2 (3,56)	214,0	1,0	214
	II (3)	2—0,5 (1,15)	187,0	1,07	175
	III (5)	0,5—0,2 (0,38)	87,4	0,54	171
Рудный Алтай (Казахстан, Россия)	I (8)	> 3	32,7	1,04	31,4
	II	(4,99)	(9,7)		
	III (7)	3—1 (2,05)	64,2 (50,1)	0,46	135,5
	IV (5)	1—0,3 (0,55)	83,6 (77,8)	0,84	99,5
		< 3 (0,18)	25,2 (50,0)	0,30	76,4
Батерст-Ньюкасл, Нью-Брансуик (Канада)	I (4)	20—5 (15,5)	94,8	0,14	677,1
	II (4)	5—1 (2,05)	51,8	0,77	67,3

* В скобках — среднее.

цинково-свинцово-медных колчеданных месторождений Куроко. Отчетливо выявляется главенствующая роль черных руд как основных концентраторов Au и Ag; в ряду от черных к пиритовым рудам происходит постепенное уменьшение их содержания и отношения Ag:Au. Высокая концентрация Ag в черных рудах корреспондируют наибольшему развитию главных промышленных концентраторов этого металла — галенита и блеклых руд. Помимо этого имеются указания [13, 15] на присутствие в этих рудах собственно серебряных минералов: аргентита, ялпаита, штроемейерита, маккинстрита, штернбергита, пирсеит-полибазита, пираргирита—пруститита и матильдита. Основное количество Au, по-видимому, присутствует в виде электрума, который, как и серебряные минералы, концентрируется главным образом в верхней части черных руд, хотя проявляется значительно реже во всех других типах руд.

Для большинства колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая — девонских аналогов миоценовых месторождений Куроко (рассматриваемых авторами в составе единого типа куроко) — также характерно повышенное (относительно типов кипрского, бесси и уральского) содержание Ag и Au. Основные формы нахождения Ag — изоморфное вхождение в галенит и блеклую руду и образование собственных минералов, из которых наиболее широко распространены самородное Ag и электрум, акантит, гессит, в несколько меньшей степени — штроемейерит, фрейбергит, пираргирит, стефанит. В отличие от миоценовых месторождений Куроко здесь отмечаются теллуриды Ag (гессит, петцит, сильванит) [5].

Наиболее молодые рудноалтайские месторождения франского возраста характеризуются наименьшим количеством собственных минералов Ag. Основную долю встречающихся здесь собственных минеральных форм Ag составляют самородное серебро и электрум, в единичных случаях отмечены акантит, пираргирит, несколько чаще фрей-

бергит. Для месторождений этого возраста, в которых доля полиметаллических руд относительно невысока, проявляется наиболее тесная связь между содержанием Pb и Ag, т.е., по-видимому, большая часть Ag находится в галените, тем более что блеклая руда в этих месторождениях по составу в основном ближе к теннантиту и не характеризуется высоким содержанием Ag.

Так, для Шемонаихинского месторождения содержание Ag в целом достаточно высокое и составляет 91,8 г/т. Однако в самих рудах минералы Ag не обнаружены. Собственно серебряная минерализация возникает на контакте с медно-цинковыми рудами в порудной гидротермально переработанной дайке диабазов, где помимо кобальтина обнаружена группа минералов Ag: самородное серебро, аргентит, пираргирит и фрейбергит. Возникновение отдельных фаз блеклых руд с повышенным содержанием серебра и собственных минералов серебра носит на этом месторождении определенно более поздний, наложенный характер.

В рудноалтайских месторождениях эйфель-живетского возраста число обнаруженных собственных минералов серебра возрастает в два раза. По числу собственных минералов Ag среди них лидирует Стрежанское месторождение, существенно медно-цинковые руды которого не отличаются высоким средним содержанием ни Pb, ни Ag. Однако в результате метаморфической регенерации образуются многочисленные сульфидно-кварцевые жилы, в составе которых выделяют серебряно-сульфосольную и сульфотеллуридно-кварцевую минеральные ассоциации, включающие многочисленные минералы Ag: самородное серебро, гессит, акантит, ялпаит, штрмейерит, пирсеит, стибиопирсеит, миаргирит, фрейбергит, стефанит.

Наиболее высокосеребряное месторождение из рудноалтайских объектов эйфельского возраста — Зареченское (Змеиногорский район), где обнаружено резко повышенное среднее содержание Ag в рудах при повышенной концентрации Pb, а также широко развиты собственные минералы Ag. Основное количество Ag на месторождении связано с золото-серебро-борнит-халькозиновой ассоциацией, наиболее широко развитой в массивных полиметаллических рудах. Главными минералами этой ассоциации являются борнит и халькозин; в несколько меньшем количестве представлены галенит, блеклая руда и халькопирит. В этой ассоциации довольно часто присутствуют самородные Au и Ag, а также сульфиды этих металлов (аргентит, ялпаит, штрмейерит), теллуриды (гессит, сальванит) и сульфосоли (полибазит, ленгебахит). Золото-серебро-борнит-халькозиновая ассоциация по времени образования рассматривается как наиболее поздняя.

Таким образом, большинство собственных минералов Ag на рудноалтайских месторождениях франского, живетского и эйфельского возраста образовалось, по-видимому, в результате метаморфических преобразований руд и регенерации; изначально подавляющее количество Ag было заключено в галените.

Значительное распространение имеют серебряные минералы в рудах месторождений эмского возраста. Прежде всего содержание Ag повышается здесь во втором (после галенита) минерале-носителе Ag — блеклой руде, характеризующейся существенно тетраэдрическим составом.

Так, для Ново-Лениногорского месторождения (Лениногорский район) к общим особенностям блеклых руд относятся: значительное преобладание сурьмянистых разновидностей над мышьяковистыми, низкая железистость, высокие цинковистость и серебрянистость, что позволяет классифицировать их как цинковистые фрейбергиты, серебрянистые зандберггериты и биниты. Учитывая достаточно широкое развитие блеклых руд на месторождении и выявленные особенности их состава, можно полагать, что они являются основными минералами-концентраторами Ag. В барит-полиметаллических, а также в полиметаллических рудах Ново-Лениногорского месторождения довольно обычно находят электрума, тонкие прожилки и овальные выделения которого приурочены к существенно галенитовым прожилкам и к контактам галенита и барита. Содержание Ag в электруме колеблется от 21 до 55 мас.%. Самородное серебро установлено в единичных случаях в пластовых барит-полиметаллических рудах. В таких же рудах залежи Богатой обнаружены многочисленные выделения сульфосоли Ag, по составу определенной как стибиопирсеит. Минерал присутствует либо в виде изометричных зерен в сростании с блеклой рудой и галенитом, либо в виде тонкозернистых субграфических сростаний с блеклой рудой. Состав минерала варьирует от $(Ag_{13,29}Cu_{2,98})_{16,27}(As_{0,75}Sb_{1,23})_{1,98}S_{10,74}$ до $(Ag_{13,60}Cu_{3,30})_{16,9}(As_{1,45}Sb_{0,80})_{2,24}S_{9,78}$. Минерал близкого состава, диагностируемый как стибиопирсеит, был установлен ранее на Стрежанском месторождении — $(As_{12,40}Cu_{6,24})_{18,64}(As_{1,77}Sb_{0,34})_{2,11}S_{18,0}$ [2].

Для Риддер-Сокольного месторождения (Лениногорский район) также обычно находят разнообразных серебряносодержащих минералов. Из собственных минералов Ag известны самородное серебро, электрум, акантит, гессит, сальванит, пирсеит, пираргирит, фрейбергит, которые встречаются преимущественно в полиметаллических и барит-полиметаллических рудах на верхних и средних горизонтах большинства залежей. В то же время отмечено, что наибольшая серебрянистость свойственна галениту из медно-цинково-колчеданных руд (1060 г/т), в котором часто присутствует и Bi. Корреляция Ag и Bi в этом случае прямая. Обычно галенит больше обогащен Ag в участках руд с убогим содержанием Pb.

Пример — руды глубоких горизонтов Быструшинской залежи, представленные медноколчеданными и медно-цинково-колчеданными разновидностями прожилково-вкрапленной, прожилково-полосчатой и пятнистой текстуры. Галенит присутствует как второстепенный или даже как редкий минерал в виде мелких включений (0,01—0,03 мм, реже 0,05 мм) в

Таблица 4

Типоморфные редкие минералы в колчеданно-полиметаллических месторождениях типа куроко

Минерал	Формула	Минерал	Формула	Минерал	Формула	Минерал	Формула
Куроко (Япония)		Рудный Алтай					
Сульфиды As, Sb, Bi		Теллуриды Au, Ag, Bi, Pb					
Реальгар	AsS	Гессит	Ag ₂ Te	Пильзенит	Bi ₄ Te ₃	Тетрадимит	Bi ₇ Te ₂ S
Аурипигмент	As ₂ S ₃	Сильванит	AgAuTe ₄	Верлит	Bi ₁ Te	Алексит	PbBi ₇ Te ₇ S ₇
Стибнит	Sb ₂ S ₃	Петцит	Ag ₃ AuTe ₂	Теллуру-висмутит	Bi ₂ Te ₃	Минерал "С"	(Bi, Pb) ₂ (Te, S) ₄
Гетчеллит	AsSbS ₃	Алтаит	PbTe				
Висмутин	Bi ₂ S ₃						
Сульфосоли Ag							
Пирсеит	Ag ₁₆ As ₂ S ₁₁	Пирсеит	Ag ₁₆ As ₂ S ₁₁	Фрейбергит	(Ag, Cu, Fe, Zn) ₁₂ (Sb, As) ₄ S ₁₃	Миаргирит	AgSbS ₂
Прустит	Ag ₃ AsS ₃	Прустит	Ag ₃ AsS ₃			Стефанит	Ag ₅ SbS ₄
Фрейбергит	(Ag, Cu, Fe, Zn) ₁₂ (Sb, As) ₄ S ₁₃	Ленгенбахит	Pb ₆ (Ag, Cu) ₂ As ₄ S ₁₃	Полибазит	Ag, Cu) ₁₆ Sb ₅ S ₁₁	Диафорит	Pb ₂ Ag ₃ Sb ₃ S ₈
Полибазит	(Ag, Cu) ₁₆ Sb ₅ S ₁₁	Стибиопирсеит	(Ag, Cu) ₁₆ (As, Sb) ₂ S ₁₁	Пираргирит	Ag, Cu) ₁₆ Sb ₅ S ₁₁	Фрейслебенит	AgPbSbS ₃
Пираргирит	(Ag, Cu) ₁₆ Sb ₅ S ₁₁						
Висмутовые сульфосоли							
Виттихенит	Cu ₃ BiS ₃	Виттихенит	Cu ₃ BiS ₃	Крупкаит	PbCuBi ₃ S ₆	Галеновисмутит	PbBi ₂ S ₄
Эмплектит	CuBiS ₂	Эмплектит	CuBiS ₂	Козалит	Pb ₂ Bi ₂ S ₅	Канницарит	Pb ₄ Bi ₄ S ₁₃
Айкинит	PbCuBiS ₃	Догначкаит	Cu ₂ Bi ₄ S ₇ (?)	Кобеллит	Pb ₂₂ Cu ₄ (Bi, Sb) ₃₀ S ₆₉	Лиллианит	Pb ₃ Bi ₂ S ₆
		Айкинит	PbCuBiS ₃	Матильдит	AgBiS ₂	Бурсаит	Pb ₅ Bi ₄ S ₁₁
		Рецбаниит	Pb ₃ Cu ₂ Bi ₁₀ S ₁₉	Хейровскит	Pb ₁₀ AgBi ₅ S ₁₈	Виттит	Pb ₉ Bi ₁₂ (S, Se) ₂₇
		Линдстремит	PbCuBi ₃ S ₅	Гунгаррит	AgBiS ₂	Гиссенит	Pb ₁₃ (Cu, Ag)(Bi, Sb) ₉ S ₂₈
		Хаммарит	Pb ₂ Cu ₂ Bi ₄ S ₆				

халькопирите. В среднем содержание Bi составляет 1,2 мас.%, Ag — 0,6 мас.%. Здесь наблюдается частный случай общей закономерности для алтайских месторождений: обогащение галенита серебром в связи с увеличением концентрации висмута в галените. Ag и Bi замещают Pb в галените по известной схеме ограниченного гетеровалентного изоморфизма:



Кроме того, в халькопирите установлены многочисленные однофазовые, чаще многофазовые включения размером 0,015—0,03 мм. В последних выявлены 3—4 фазы, которые почти всегда содержат теллурид Ag — гессит, галенит, а также различные минералы Bi: тетрадимит, жозеит-В, алексит, верлит, пильзенит, самородный висмут [5].

Другие рудноалтайские месторождения эмского возраста также характеризуются наличием широкого спектра собственных минералов Ag. На Зыряновском месторождении (Зыряновский район) это гессит, штромейерит, ялпаит, дискразит, стефанит, полибазит, диафорит. В рудах Березовского месторождения

(Прииртышский район) отмечены самородное серебро, электрум, штромейерит, миаргирит, пираргирит.

Как сказано выше, в распределении Au по типам вулканогенных колчеданных месторождений наблюдается меньшая определенность, чем в распределении Ag. В целом уральские и алтайские месторождения близки по содержанию Au, но уступают по этому показателю месторождениям Куроко (Япония), в то же время отмечаются пробы со значительным содержанием Au (до 2 г/т и более) для месторождений кипрского типа (Кипр, Турция). Рассматривая Au в месторождениях типа куроко, можно увидеть, что чаще всего обогащены Au верхние части залежей полиметаллических руд. В то же время в некоторых случаях отмечается повышенное содержание Au и в медноцинково-колчеданных, и в медно-колчеданных рудах.

Минералогия Au гораздо беднее, чем Ag. Наибольшая концентрация Au сосредоточена, в электруме, который для алтайских месторождений, например, встречен во всех типах руд. Электрум может находиться в ассоциации со всеми рудными минералами и со многими нерудными (кварцем, серицитом, хлоритом и т.д.). Состав электрума варьирует в широких пределах.

Разнообразный ряд минералов в колчеданных месторождениях дают такие элементы, как As, Sb, Bi. Их сульфиды реальгар, стибнит, гетчелит присущи миоценовым месторождениям Куроко (в этом проявляется их сходство с современными гидротермальными рудами, так называемыми черными курильщиками), в то время как в более древних рудах отмечается лишь висмутин.

Руды месторождений типа куроко (особенно рудоалтайских) отличаются повышенным (по сравнению, например, с уральскими колчеданными месторождениями) содержанием Bi, которое на отдельных объектах достигает промышленных величин. При этом даже при низком содержании Bi в рудах (сотые и тысячные доли процента) отчетливо проявляется его способность к образованию собственных минеральных фаз, чаще всего это самородная форма и висмутин, реже теллуриды и сульфотеллуриды, разнообразные сульфосоли (табл. 4).

Несмотря на крайне неравномерное распространение висмутовой минерализации и ее разнообразие в рудах месторождений Рудного Алтая, отчетливо устанавливается, что при повышенном содержании Bi в рудах наблюдается и увеличение его концентрации в галените и блеклой руде, появляются собственные минеральные формы этого металла, представленные самородным висмутом, его сульфидами, теллуридами, сульфотеллуридами, а также висмутовыми и сурьмяно-висмутовыми сульфосолями Cu, Pb и Ag. Установлена отчетливая зависимость числа висмутовых минералов от возраста месторождений и связанного с ним состава руд. По мере омоложения возраста от эмсского, эйфельского до эйфель-живетского и франского число минералов Bi в рудах в целом увеличивается, т.е. наблюдается тенденция прямо противоположная проявлению здесь серебряной минерализации, отмеченной выше. В рудах более молодых месторождений (эйфель-живетских и франских) список висмутовых минералов заметно увеличивается за счет появления сульфосолей Pb, Pb и Ag, а также за счет увеличения количества сульфосолей Cu, Cu и Pb; доля самородного висмута, его сульфидов, теллуридов и сульфотеллуридов резко снижается.

Пример месторождения, на котором широко развита висмутовая минерализация, — Юбилейно-Снегирихинское (эйфельско-живетского возраста), расположенное в Северо-Восточной зоне смятия Рудного Алтая. Содержание Bi в галените колеблется от 0,3 до 3,2 мас.%, в блеклой руде — до 16 мас.%. Главным представителем собственных висмутовых минералов является айкинит. Кроме того, в виде пойкилитовых включений в крупнозернистом кристаллическом пирите встречаются сульфид Bi — висмутин, а также сульфосоли (эмплектит и галеновисмутит) и теллуриды (тетрадимит и алексит).

На Ново-Березовском месторождении франского возраста минералы висмута встречаются в обоих выделенных здесь типах руд. В серколчеданных (более

ранних) будинированных залежах висмутовая минерализация более разнообразна: многочисленные пойкилитовые включения в крупнозернистом перекристаллизованном пирите выполнены сульфидом (висмутином), сульфосолями (линдстремитом, эмплектитом, догначкаитом), реже сульфотеллуридами (тетрадимитом и минералом "С"). Содержание Bi в блеклых рудах достигает 10 мас.%. Во втором типе руд преобладает самородный висмут, тесно ассоциирующий с пирротинном и галенитом; также образуются сурьмосодержащие висмутовые сульфосоли (кобеллит и гессинит).

На одном из крупнейших Риддер-Сокольном месторождении эмсского возраста минералы висмута обнаружены лишь на глубоких горизонтах в секущих субвертикальных жильно-штокерковых халькопирит-кварцевых рудах Быструшинской залежи. Эти минералы встречаются в халькопирите в составе гетерофазных включений и представлены теллуридами и сульфотеллуридами: тетрадимитом, верлитом, пильзенитом, алекситом и жозеитом-В. Все перечисленные минералы, а также ассоциирующий с ними галенит, характеризуются повышенным содержанием Se.

Для интенсивно метаморфизованных месторождений Рудного Алтая характерно совместное присутствие минералов Bi и Sb. Так, для месторождений Малеевско-Путинцевского рудного поля, где висмутовая минерализация находится в зоне контактового метаморфизма интрузии гранитоидов, наряду с разнообразными висмутовыми сульфосолями Pb (галеновисмутит, канницарит, виттит, хейровскит), Cu и Pb (айкинит, хаммарит, крупкаит, линдстремит) обнаружены минералы Sb — бертьерит, гудмундит, нисбит; кроме того, примесь этого металла установлена в козалите, купрокозалите, айкините и самородном висмуте (до 5%).

В рудах миоценовых месторождений Куроко в Японии минералы Bi представлены висмутином и сульфосолями: виттихенитом, эмплектитом, айкинитом, при этом совершенно отсутствуют теллуриды Bi.

Для метаморфизованных палеозойских и особенно докембрийских руд, независимо от их принадлежности к аналогам того или иного типа, характерно присутствие сульфоантимонитов Pb (буланжерит, бурнонит, джемсонит, геокронит, менегенит, иорданит, андорит), а также антимонидов и сульфоантимонидов Fe и Ni (гудмундит, брейтгауптит, ульманит, нисбит, бертьерит) (табл. 5), в которых сурьма, возможно, является продуктом разложения первичных блеклых руд.

Можно предполагать, что метаморфическое образование редких минералов происходит в результате по крайней мере трех главных процессов: 1) разложение первичных минералов: теннантит ↔ арсенопирит + халькопирит + сфалерит + (блеклая руда); тетраэдрит ↔ пирротин (халькопирит) + гудмундит, тетраэдрит ↔ пирротин + халькопирит + Sb_{сам} + (сфалерит) + (гудмундит) [10], тетраэдрит + галенит ↔ тетраэдрит + менегенит + халькопирит + сфалерит + арсенопирит + Ag_{сам}. [11];

Таблица 5

Типоморфные минералы в метаморфизованных рудах докембрийских колчеданных месторождений

Минерал	Формула	Минерал	Формула
Сульфиды	Sb и As—Sb сульфосоли		
Пирротин	$Fe_{1-x}S$	Фрейбергит	$(Ag, Cu, Fe)_{12}Sb_4S_{13}$
Кубанит	$CuFe_2S_3$	Бурнонит	$PbCuSbS_3$
Со-пентландит	$(Co, Ni, Fe)_9S_8$	Менегенит	$Pb_{11}CuSb_7S_{24}$
Ag-пентландит	$Ag(Fe, Ni)_9S_8$	Буланжерит	$Pb_5Sb_4S_{11}$
Станнин	Cu_2FeSnS_4	Геокронит	$Pb_{14}(Sb, As)_6S_{21}$
Сульфид Pb и Mo	$(PbMo)S_2$	Андорит	$PbAsSb_3S_6$
		Иорданит	$Pb_{14}(As, Sb)_6S_{21}$
		Джемсонит	$Pb_4FeSb_6S_4$
Арсениды и сульфоарсениды		Оксиды	
Арсенопирит	$FeAsS$	Магнетит	Fe_3O_4
Леллингит	$FeAs_2$	Уранинит	UO_2
Герсдорфит	$NiAsS$	Ганит	$ZnAl_2O_4$
		Карелианит	V_2O_3
		Щербинаит	V_2O_5
Антимониды и сульфоантимониды		Силикаты	
Гудмундит	$FeSbS$	Гиалофан-цельзиан	$(K, Ba)Al(Si, Al)_3O_8$
Бертьерит	$FeSb_2S_4$		$BaAl_2Si_2O_8$
Нисбит	$NiSb_2$	Кимрит	$BaAl_2Si_2(O, OH)_8 \cdot H_2O$
Брейтгауптит	$NiSb$	Анандит	$(Ba, K)(FeMg)_3(Si, Al, Fe)_4O_{10}(OH)_2$
Ульманит	$NiSbS$		

3) рассеяние главных (конституционных) рудообразующих элементов (Ba, Zn) с появлением силикатов бария (гиалофана-цельзиана, анандита, кимрита) и цинксодержащих оксидов и силикатов (ганита, ставролита, мусковита и др.): барит + серицит + хлорит ↔ гиалофан-цельзиан + биотит + (барит).

Заключение. Таким образом, руды вулканогенные колчеданных месторождений отличаются не только содержанием главных (S, Fe, Cu, Zn, Pb, Ba), но и попутных (Co, Ni, Au, Ag, Bi, Te, Se, As, Sb, Hg, Cd, Sn, Ge, V, In, U и др.) компонентов, что отразилось в образовании второстепенных и редких минералов, типоморфных для выделенных типов (табл. 6). С повышением концентрации попутных металлов в рудах возрастает вероятность появления их собственных минералов. По мере усложнения химического состава и связанного с ним минерального состава руд по главным минералам от месторождений типов кипрского и бесси к месторождениям уральского и куроко типов возрастает и разнообразие встречающихся в них редких минералов, причем как за счет появления новых групп, так и за счет появления новых минеральных видов в группах. Как видно на рис. 2, по мере “утяжеления” основных рудообразу-

Таблица 6

Типоморфные минеральные ассоциации в вулканогенных колчеданных месторождениях

Недифференцированные базальтоидные формации		Бимодальные и последовательно дифференцированные базальт-риолитовые формации		
Возраст	Бесси и кипрский типы	Уральский тип	Куроко тип	Возраст
MZ PZ	Сульфиды Арсениды Сульфоарсениды Теллуриды } Co Ni		Сульфиды Ag, Au Сульфоарсениды } Сульфоантимониты } Сульфовисмутиты } Ag Cu Pb	KZ
		Сульфиды Ag, Au Сульфоарсениды } Сульфоантимониты } Ag Cu Pb	Сульфиды Ag, Au Сульфоарсениды } Сульфоантимониты } Сульфовисмутиты } Ag Cu Pb	PZ
PE		Теллуриды Ag, Au, Pb, Bi, Hg, Fe, Cu	Теллуриды Ag, Au, Bi, Pb	PE—PZ
		Сульфоантимониты Pb-антимониды и сульфоантимониды Fe и Ni		

2) мобилизация рассеянных элементов-примесей с образованием их собственных минеральных видов: V — щербинаита, карелианита, ноланита; U — уранинита; Sn — станнина, теллуруконфильдита; Mo — молибденита и сульфида свинца и молибдена;

ющих металлов в ряду месторождений кипрского и бесси типов к уральскому и далее к типу куроко ($Cu \rightarrow Cu + Zn \rightarrow Cu + Zn + Pb$) происходит вовлечение в рудообразующий процесс все более тяжелых попутных элементов (Te, Sb, Bi), что приводит к образованию минералов, обладающих большими средними атомными

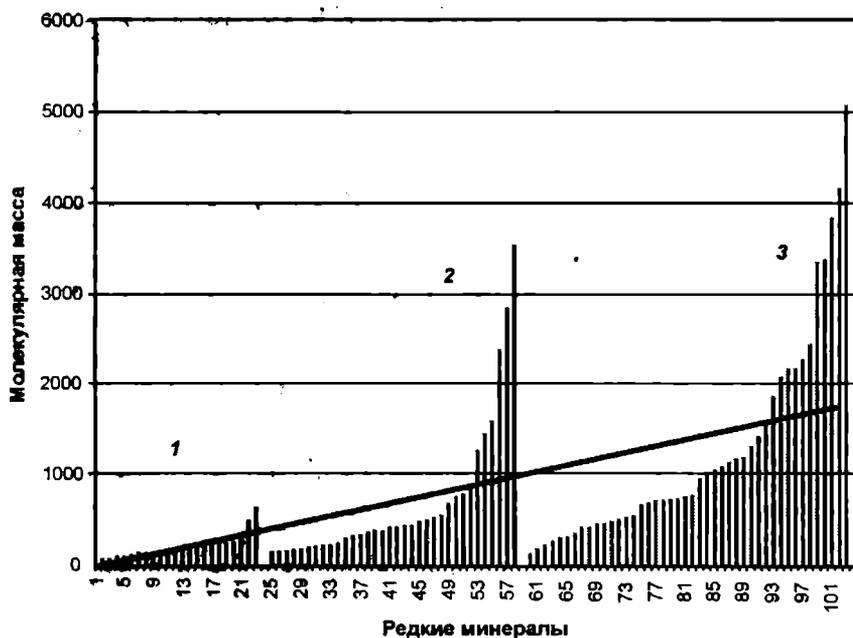


Рис. 2. Молекулярная масса редких минералов в рудах вулканогенных колчеданных месторождений разных типов: 1 — кипрский и бесси, 2 — уральский, 3 — куроко

номерами и молекулярной массой. Такая тенденция, по-видимому, отражает возрастающую роль континентальной коры как возможного источника Rb и других металлов колчеданных руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдюкин В.В., Сергеева Н.Е. Редкие металлы в эволюционных рядах колчеданно-полиметаллических месторождений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1999. № 4. С. 40—48.
2. Бочек Л.И., Еремин Н.И., Округин В.М. Стибиопирсеит в рудах Стрежанского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Новые данные о минералах СССР. Вып. 26. М., 1978. С. 15—21.
3. Гайский ГОК; геология Гайского и Подольского медно-цинковых колчеданных месторождений на Урале. Екатеринбург: ИГТ УрОРАН, 2004.
4. Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Нат.Е., Позднякова Н.В. Типы колчеданных месторождений вулкани-

ческой ассоциации // Геология рудн. месторождений. 2000. № 2. С. 177—190.

5. Еремин Н.И., Сергеева Нат.Е., Дергачев А.Л., Позднякова Н.В. Благородные металлы в вулканогенных колчеданных месторождениях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2000. № 2. С. 52—59.

6. Еремин Н.И., Сергеева Нат.Е., Дергачев А.Л., Позднякова Н.В. Кобальт и никель в колчеданных месторождениях недифференцированных базальтоидных формаций // Там же. 2005. №3. С. 22—28.

7. Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс, 2002.

8. Контарь Е.С., Либарова Л.Е. Рудные формации и типы колчеданных месторождений Урала // Геология рудных месторождений. 1986. № 1. С. 30—39.

9. Кривцов А.И., Минина О.В., Волчков А.Г. и др. Месторождения колчеданного семейства. Сер.: Модели месторождений благородных и цветных металлов. М., ЦНИГРИ, 2000.

10. Мозгова Н.Н., Цепин А.И. Блѣкые руды. М.: Наука, 1983.

11. Сакия Д.Р. Роль блѣкых руд в возникновении новообразований в полиметаллических рудах Рудного Алтая // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1995. №3. С. 46—52

12. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, 1987.

13. Geology of Kuroko Deposits. Mining Geology Special Issue. The Society of Mining Geologists of Japan. Tokyo, 1974. № 6.

14. Mzgovna N.N., Krasnov S.G., Batuyev B.N. et al. The first report of cobalt pentlandite from a Mid-Atlantic Ridge hydrothermal deposit // Canad. Mineral. 1996. Vol. 34. P. 23—28.

15. Urabe T. Mineralogical aspects of the Kuroko deposits in Japan and their implications // Mineral Deposite. 1974. N 9. P. 309—324.

Поступила в редакцию
06.06.2006