

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩАХ УРАЛА

В.П. Молошаг*, К.К. Золоев, Д.А. Додин*****

**Институт геологии и геохимии УрО РАН*

620151, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7

E-mail: moloshag@igg.uran.ru

***ОАО Уральская геологосъемочная экспедиция*

620014, г. Екатеринбург, ул. Вайнера, 55

E-mail: zoloev@ugse.isnet.ru

****Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов*

Мирового океана (ВНИИОкеангеология)

190121, г. Санкт-Петербург, Английский просп., 1

Поступила в редакцию 13 февраля 2008 г.

Проявления сульфидной минерализации черносланцевых толщ Сурьинско-Промысловской зоны отличаются промышленно значимыми содержаниями золота, а также платины и палладия, которые подтвердились повторными исследованиями Института ГЕОХИ РАН. Наряду с наличием самородного золота оно присутствует в виде примеси в сульфидах и сульфоарсенидах. Собственные минералы палладия и платины пока не установлены, эти элементы находятся в виде примесей в сульфидах и сульфоарсенидах. Находки кластеров (наночастиц) интерметаллида платины Pt_3Fe в углеродсодержащей флишоидной толще Тагильского прогиба, близкой по литологическому составу рудовмещающим породам Сурьинско-Промысловской зоны говорят о возможности присутствия минералов платины в черносланцевых рудопроявлениях. Колчеданные месторождения Урала отличаются от черносланцевых рудопоявлений преобладанием концентрации золота над платиноидами. В этих месторождениях золото наблюдается в виде собственных минералов, самородного золота и теллуридов, а также примесей в рудообразующих сульфидах. В рудах колчеданных месторождений существует геохимическая и минералогическая связь золота со свинцом и мышьяком. На основе анализа опубликованных экспериментальных исследований показана возможность поступления части свинца, золота и других рудных компонентов с водными флюидами, содержащими серу, мышьяк и хлор, которые освобождались в процессе высокотемпературной дегидратации пород при субдукции блоков континентальных окраин.

Ключевые слова: *черносланцевые и колчеданные месторождения, золото, палладий и платина, перенос золота и свинца, высокотемпературные флюиды.*

SOME PECULIARITIES OF PRECIOUS METAL CONCENTRATION IN SULFIDE ORE DEPOSIT AND METAL-RICH BLACK SHALES (ON THE EXAMPLE OF THE URALS)

V.P. Moloshag, K.K. Zoloev, D.A. Dodin

**Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS*

**Urals Geological Survey Expedition*

****All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of World Ocean*

The ore occurrence in metal-rich black shales of the Surinsko-Promyslovsky region have the high contents of Au and platinum group elements (PGE) which have been confirmed by a second examination in the Geochemical Institute of RAS. Together with native gold there is as admixture in sulfides and sulphoarsenides. There aren't own minerals of palladium and platinum here, this elements are present as admixture in sulfides and sulphoarsenides too. Occurrences of clusters (nanoparticles) of Pt_3Fe in black shale series of the Tagil trough which is lithologic analogy to metal-rich black shales of Surinsko-Promyslovsky region say about possibility of the own platinum minerals presence in metal-rich black

shales. The sulphide deposits of the Urals differ from black schists manifestations by prevailing of gold concentration over PGE. In these deposits Au occurs as its own minerals, native gold and tellurides and as admixtures in ore-forming sulfides too. The own PGE-minerals in massive sulfide ores of the deposits haven't been found. In massive sulfide ore deposits a geochemical and mineralogical connection of Au with Pb and As is observed. The possibility of Pb, Au and other ore components inflow with hydrous fluids containing S, As and Cl which have been released during high pressure dehydration of rocks while subducting of continental margin blocks has been shown on a base of analysis of experimental study publications.

Key words: *metal-rich black shales, massive sulfide ore deposits, gold, palladium and platinum, transport of gold and lead, high-pressure fluids.*

Введение

Благороднометальная минерализация, пространственно и генетически связанная с черносланцевыми породами, в ближайшей перспективе представляет несомненный практический интерес. Наиболее подробно она изучалась в пределах Сурьинско-Промысловской минерагенической зоны Северного и Среднего Урала. Согласно данным последних исследований она является составной частью комплексного редкометально-золото-платиноидно-полиметаллического оруденения [Тектоническое..., 2006]. Субстратом образования рассматриваемого оруденения служили породы рифейского возраста. Основная часть рассматриваемой рудной зоны формировалась главным образом в среднем-позднем ордовике в процессе продолжавшегося континентального рифтогенеза, сопровождавшегося внедрением базит-гипербазитовых мантийных масс. С тыловой частью Сурьинско-Промысловской металлогенической зоны, в пределах островной дуги силурийско-раннедевонского палеоокеана, связано медное и свинцово-цинковое колчеданное оруденение с интенсивным проявлением золота и, реже, металлов платиновой группы в углеродистых и сопряженных с ними вулканогенно-осадочных породах.

На Среднем и Северном Урале площади развития колчеданных месторождений по тектоническим шовным зонам примыкают к площадям черносланцевого оруденения, что наряду с перекрыванием возрастных интервалов формирования этих руд, несмотря на различие геодинамических обстановок и состава руд этих месторождений, дает основание для сопоставления условий накопления благородных металлов в этих месторождениях. Дополнительным импульсом для такого анализа послужили данные о наличии металлов платиновой

группы в рудах колчеданных месторождений и проявлений рассеянного органического вещества в современных подводных сульфидных гидротермальных постройках и их непосредственном окружении. Черносланцевые породы известны на ряде колчеданных месторождений [Медноколчеданные..., 1985; 1988; Франклин и др., 1984]. Представляется возможным использовать методические разработки, полученные при исследованиях отечественных и зарубежных золоторудных месторождений, для изучения форм нахождения благородных металлов в рудах колчеданных месторождений. Они, в первую очередь, были получены на материале исследований руд карлинского типа и генетически связанных с ними месторождений черносланцевой формации, которые отличаются наличием субмикроскопических выделений золота и благородных металлов. Температурные интервалы образования руд колчеданных месторождений в ряде случаев перекрываются таковыми для черносланцевых месторождений, которые формировались при пониженной летучести серы. На Урале основные усилия исследователей многих поколений были направлены на изучение и освоение колчеданных месторождений, что представляет несомненный интерес и для освоения месторождений, связанных с черными сланцами. Специфика геологических условий образования и локализации черносланцевых месторождений рассмотрена авторами в предыдущих работах [Золотов и др., 2007; Тектоническое..., 2006], в связи с чем специально на этих вопросах мы останавливаться не будем.

Целью предлагаемой статьи является сравнительный анализ условий образования и накопления благородных металлов в рудах колчеданных и черносланцевых месторождений Урала с учетом данных исследований минера-

логии и геохимии этих месторождений в других регионах.

Материалы исследований рассматриваемых в статье месторождений излагаются в следующей последовательности: геохимия благородных металлов; источники поступления благородных металлов колчеданных месторождений (по данным изотопного состава свинца из галенитов); состав рудообразующих минералов; анализ форм нахождения благородных металлов – минералы, наночастицы, атомы и ионы; заключение. Предлагаемый стиль изложения отличается от общепринятой последовательности: материалы исследований > обсуждение результатов > заключение. Это связано с тем, что наряду с рассматриваемыми черносланцевыми и колчеданными месторождениями привлекаются данные исследований золоторудных месторождений, особенности состава акцессорной сульфидной минерализации в разрезе Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 и результаты экспериментов по условиям переноса благородных металлов при различных диапазонах давления и температуры.

Методика исследований

Анализы на золото, платину и палладий в пробах черносланцевых рудопоявлений, выполнялись в Центральной лаборатории анализа вещества Института ГЕОХИ РАН (зав. сектором Э.М. Седых, аналитик Л.Н. Банных). После разложения проб, если растворы не содержали органической составляющей, определение элементов проводилось методом электротермической атомной абсорбции. При наличии в пробах данной составляющей она полностью минерализовалась. Далее проводилась экстракция и сорбция [Золоев и др., 2005].

Определения благородных металлов в валовых пробах колчеданных руд Сафьяновского месторождения выполнялись в Центральной лаборатории Государственного предприятия (ГП) «Невскгеология», Ленинградская область, Тосненский район, п. Ульяновка. Анализы на золото, платину, палладий и серебро выполнялись атомно-абсорбционным (АА) анализом; на цинк, медь, свинец с применением рентгеноспектрального (РСА) анализа.

Изучение состава минералов осуществлялось с привлечением методов локального рентгеноспектрального анализа. Используемые приборы: JXA-5 – Институт геологии и геохимии

УрО РАН; Camebax microbeam – ИГЕМ РАН; Camebax SX-50 – Бюро геологических исследований (BRGM), Орлеан, Франция. На основе, разработанной в ИГЕМ РАН методики (А.И. Цепин) с помощью микроанализатора оценивались содержания примесей золота, платины и палладия в отдельных образцах борнита и других рудообразующих сульфидов из золотосодержащих руд. Наряду с этим, анализировались примеси платины и палладия в самородном золоте. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 нА. В отличие от определения содержаний остальных элементов, где время счета составляет 10 с, для золота, платины и палладия оно удлинялось до 50-100 с. При этих условиях предел обнаружения названных элементов в борните и теннантите составил 0,01 мас. %. В отдельных случаях, например при определении золота в пирите, он достигал 0,005 мас. %. В качестве стандартов применялись чистые металлы [Викентьев и др., 2000].

Косвенным подтверждением правомерности данной методики являются результаты определения количества примесей металлов Ti, V, Fe, Ni, As, Mo, Pd, Ag, Pt, Au, Pb, U в слюдистой матрице из металлоносных сланцев Силезского бассейна, Польша [Kucha, Przybylowicz, 1999]. Минералы благородных металлов в углеродсодержащих слюдистых породах представлены тонкозернистыми, субмикроскопическими выделениями. В этом случае для анализа одних и тех же образцов использовались протонно-индуцированный рентгеноспектральный анализ, диаметр анализируемого участка $d = 3000$ мкм, протонный микроанализ $d = 3$ мкм и рентгеноспектральный микроанализ $d = 1$ мкм. Разница определений Pd, Ag, Au, не превышает 50 % (относительных) с превышением только по Pt. Превышение по платине, вероятно, связано с тем, что среди анализируемых благородных металлов она отличается наиболее низкими содержаниями и соответственно требует большего числа анализов с целью получения значимых результатов. По остальным из упомянутых элементов погрешность их определения не превышает 30 % (относительных) [Kucha, Przybylowicz, 1999].

Результаты исследований и их интерпретация

Геохимия платиноидов в рудах колчеданных месторождений начала разрабатываться

Таблица 1

Содержание платиноидов и золота в рудах колчеданных месторождений, (мг/т)

Месторождение	Пробы №	Содержание, ppb							Содержание, ppm					Источник
		Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	As	Cu	Zn	Pb		
Сафьяновское	Сф-15/99	—	—	—	—	<10	11	920	2070	2360	800	668	ГП «Невскгеология»	
	Сф-31/99	—	—	—	—	<10	10	2200	1660	9110	750	1900		
		—	—	—	—	<10	9	2400	—	—	—	—		
	Сф-42/99	—	—	—	—	41	13	1600	2460	2030	250	1130		
	Сф-49/99	—	—	—	—	<10	<5	4000	570	<0,100	299600	72240		
	Сф-71/99	—	—	—	—	<10	<5	1000	<0,100	14050	66790	239900		
	Сф-72/99	—	—	—	—	<10	10	750	1000	18170	74200	74940		
	Сф-73/99	—	—	—	—	10	6	1300	1530	18150	288500	23750		
		—	—	—	—	11	8	1200	—	—	—	—		
	Сф-81/99	—	—	—	—	32	8	2300	1400	47360	171050	19060		
	Сф-131/99	—	—	—	—	<10	<5	2200	1560	1900	19720	3770		
	Сф-8/00	—	—	—	—	22	12	190	550	361000	960	2050		
	Сф-44/00	—	—	—	—	20	<5	2500	7000	67500	20120	3800		
	Сф-75/00	—	—	—	—	23	18	4100	1900	11110	199520	82200		
	—	—	—	—	22	17	4500	—	—	—	—			
Сф-222/00	—	—	—	—	<10	11	4500	4600	28300	20910	20040			
2066/124	—	—	—	—	<10	27	620	300	2840	98800	2800			
2087/268	—	—	—	—	19	10	130	150	23300	286500	2160			
	—	—	—	—	18	10	140	—	—	—	—	—		
2104/327	—	—	—	—	<10	11	920	2070	2360	800	668	Vikentyev et al., 2004		
49	—	—	0,2	7	45	35	2756	—	—	—	—			
55	—	—	—	2	13	7	2739	—	—	—	—			
56	—	—	—	5	1	5	1857	—	—	—	—			

Окончание таблицы 1

Месторождение	Пробы №	Содержание, ppb						Содержание, ppm				Источник	
		Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	As	Cu	Zn		Pb
Бакр-Тау МЦР		—	—	—	1	6	40	6300	—	—	—	—	Добровольская, Дистлер, 1998
		—	—	—	н.о.	2	30	5900	—	—	—	—	
Александринское: Ср-Вп Ср-Ср-Ру Ср Ср-Ру		—	—	—	н.о.	8	2	2900	—	—	—	—	Добровольская, Дистлер, 1998
		—	—	—	н.о.	<1	2	7300	—	—	—	—	
		—	—	—	н.о.	12	2	<1500	—	—	—	—	
		—	—	—	н.о.	1	6	5800	—	—	—	—	
Кууроко	LG02A	—	0,14	0,46	1,45	1,40	3,52	50	—	—	—	—	Pan, Xie, 2001
	LG02B	—	0,06	0,51	0,29	0,27	0,37	112	—	—	—	—	
	LG06	—	0,05	0,44	0,10	1,37	1,41	329	—	—	—	—	
	LG07	—	0,04	0,23	0,10	0,08	0,18	5	—	—	—	—	
Бесши	LG01	—	0,06	4,7	817	3,27	1769	637	—	—	—	—	Pan, Xie, 2001 Pan, Xie, 2001
	M93/7	0,08	0,26	2,12	1,32	5,48	10,4	17	—	—	—	—	
Манитоуэлдж	M93/7 ^d	0,32	0,29	1,05	2,44	6,04	12,7	14	—	—	—	—	Pan, Xie, 2001
	W3/6	0,02	0,03	0,64	5,31	0,08	12,4	106	—	—	—	—	
	W3/7	—	0,22	0,20	12,6	0,08	27	160	—	—	—	—	
	5591	—	0,29	15	533	0,55	1149	24	—	—	—	—	
	7230	0,21	0,34	8,25	488	4,43	1042	837	—	—	—	—	
	7232	—	0,13	5,88	445	5,75	954	9129	—	—	—	—	
	LG02A	—	0,14	0,46	1,45	1,40	3,52	50	—	—	—	—	
Оутокумпу	LG02B	—	0,06	0,51	0,29	0,27	0,37	112	—	—	—	—	Pan, Xie, 2001
	LG06	—	0,05	0,44	0,10	1,37	1,41	329	—	—	—	—	
	LG07	—	0,04	0,23	0,10	0,08	0,18	5	—	—	—	—	

Примечание. МЦР – медно-цинковая руда; Ср-Вп – халькопирит-борнитовая руда; Ср-Ср-Ру – халькопирит-сфалерит-пиритовая руда; Ср – халькопиритовая руда; Ср-Ру – халькопирит-пиритовая руда. Прочерк – элемент не анализировался; н.о. – не обнаружено.

только в последние десятилетия прошлого века. По сравнению с золотом, решение этой проблемы находится на начальной стадии. Вероятной причиной такого положения являются трудности внедрения и выбора надежных методов определения содержания платиноидов в колчеданных рудах, которые должны отвечать таким противоречивым требованиям, как высокая чувствительность, производительность и экономичность. Полученные нами данные по содержанию в рудах колчеданных месторождений платиноидов и золота, включая определения мышьяка, меди, цинка и свинца из руд Сафьяновского месторождения показаны в табл. 1. Наряду с этим, приведены опубликованные результаты анализов руд по месторождениям Узельгинское, Сибайское, Бакр-Тау, Александринское, а также данные по содержанию золота и платиноидов для отдельных зарубежных месторождений. Из опубликованных анализов нами отобраны только те из них, которые содержат данные по золоту и платиноидам в каждой конкретной пробе (табл. 1). Из материалов, помещенных в данной таблице, следует, что для колчеданных месторождений свойственно преобладание содержания золота над платиноидами. Среди металлов платиновой группы ведущими являются палладий и платина.

Одной из первых работ, содержащих обзор предшествующих исследований, является статья М.И. Новгородовой [1976], которой была установлена тенденция преобладания в колчеданных рудах палладия и платины над остальными платиноидами, что в целом подтверждается опубликованными материалами отечественных и зарубежных исследователей. Содержание золота на порядок и более превышает содержание палладия и платины [Добровольская, Дистлер, 1998; Pan, Xie, 2001; Vikentyev et al., 2004]. Концентрация платиноидов в рудах колчеданных месторождений в определенной степени зависит от геодинамической обстановки их формирования. Те из них, которые пространственно и генетически связаны с вулканогенными породами среднего и кислого состава, отличаются пониженным содержанием платиноидов по сравнению с месторождениями, залегающими в основных и ультраосновных породах офиолитового комплекса [Loukola-Ruskeeniemi, 1999; Pan, Xie, 2001]. Тем не менее, независимо от геодинамической обстановки формирования месторождений, концентрация золота даже и в этих рудах преобладает над

платиноидами. Такое же соотношение концентраций золота и платиноидов наблюдается в сульфидных рудах современных подводных гидротермальных построек, где оно также практически не зависит от геодинамических обстановок [Богданов и др., 2002; Лисицын и др., 1999].

Результаты анализов представительных проб углеродсодержащих пород, отобранные на площадях наиболее перспективных на золото-платиноидное оруденение, приведены в табл. 2-4. Они свидетельствуют о преимущественно платиновой специализации участков оруденения палеозойских образований по сравнению с палладиевым уклоном специализации МПГ терригенно-вулканогенных толщ позднего рифея. В отдельных местах указанных площадей концентрации благородных металлов достигают 5,8 г/т. Особый интерес представляет Ашкинская рудоносная зона, где фиксируется золотое оруденение с Pd и, реже, Pt. Эта зона в пределах самой Ашкинской площади характеризуется значительными содержаниями золота в окисленных рудах (до 40 г/т и более). Наряду с этим, методом ICP-MS в представительных усредненных пробах рудопроявлений в углеродистых сланцах определялось содержание благородных и редких металлов, которые приведены в табл. 3. Локализация участков отбора этих проб показана на геологической схеме Ишери́мского антиклинория [Тектоническое..., 2006, рис. 2.7]. Данные о средних содержаниях золота, платины и палладия наиболее перспективных рудопроявлений, локализованных в углеродсодержащих породах, приведены в табл. 4. Площади развития этих рудопроявлений показаны в [Тектоническое..., 2006, рис. 2.10].

Из результатов различных лабораторий, которые упомянуты в [Золоев и др., 2005], мы предпочитаем данные лаборатории ГЕОХИ РАН. Это связано с тем, что применяемая методика разработана для анализа руд черносланцевых месторождений, в том числе разрабатываемого месторождения Олимпиада и ряда других перспективных месторождений, которые характеризуются присутствием органических веществ. Особого внимания заслуживают приведенные в табл. 2 данные, отражающие понижение содержания золота и платиноидов, если перед определением этих элементов не было проведено полное разложение органической составляющей. В процессах термической и кислотной обработки проб при аналитических операциях происходит трансформация частиц

Содержание благородных металлов в углеродистых сланцах, (г/т)

Месторождения, площади, зоны, участки	Характеристика проб	№ пробы	Au	Pt	Pd
Ашкинское	Брекчия слюдистых сланцев с кварц-сульфидным цементом	60	40,0/40,0	0,20	1,75
	Кварцевые жилы в углеродистых кварц-серицитовых сланцах	61	1,25/1,25	0,10	0,50
	То же	62	2,50/1,30	0,20	0,75
	Сульфидизированные кварцито-сланцы	63	0,20/0,20	0,15	0,75
Кедровская площадь, Хионинский участок	Слабо серицитизированные углисто-кварц-серицитовые сланцы	66	0,40/0,40	1,00	0,80
	То же	69	0,50/0,50	0,90	0,12
	Сульфидизированные метасоматиты лиственит-березитовой формации	67	2,30/2,30	0,30	0,37
	То же	68	0,35/0,35	0,10	0,50
Даньковский участок	Слабо сульфидизированные углисто-кварц-серицитовые сланцы	71	0,80/0,30	0,40/0,07	0,75/0,60
	То же	72	0,60/0,30	0,15	0,32
	То же	73	0,05/0,05	0,10	0,40
Леневский участок, береговые обнажения р. Койва	Метасоматически измененные слабо сульфидизированные углисто-кварц-серицитовые сланцы, прорванные дайками сиенит-порфиров	76	1,00/1,00	3,20	0,75
	То же	78	0,40/0,30	1,50	1,00
	То же	79	0,20/0,20	2,25	0,50
	То же	80	0,35/0,35	4,20	1,00
Леневский участок, пос. Промысла	Углисто-серицит-кварцевые сланцы со слабо выраженными окварцеванием и сульфидной минерализацией	44	0,35/0,15	5,0/0,75	1,00/0,25
	То же	52	3,35/0,15	1,50	1,00
	То же	55	0,25/0,15	1,50	1,70
	Окварцеванные углисто-серицит-кварцевые сланцы со слабо выраженной сульфидной минерализацией	49	3,00/0,15	2,5/0,25	1,10/0,38
	То же	54	0,40/0,15	0,65/0,12	0,12/0,025

Примечание. В числителе – результаты после полного разложения материала проб, в знаменателе – до разложения органической составляющей. Источник – [Золоев и др., 2005].

органического вещества, при которой на их поверхности образуются кислородсодержащие карбоксильные группы. При сорбции из растворов ионов Au(III), Pd(II) и Pt(IV) на поверхности этих частиц образуются комплексные соединения благородных металлов, в состав которых входят карбоксильные функциональные группы CO. При последующей термической

обработке проб комплексные соединения золота и платиноидов переходят в летучие (карбонильные и карбонилхлоридные) соединения благородных металлов [Варшал и др., 1994]. За счет образования летучих соединений в процессе выполнения аналитических операций потери золота и платиноидов могут достигать одного-двух порядков.

Экспериментальные исследования при физико-химических параметрах рудообразования показали, что золото и платиноиды в гидротермальных растворах переносятся в виде неорганических комплексных соединений с хлором, серой, мышьяком и, в меньшей степени, – с водой и углекислотой [Hayashi, Omoto, 1991; Gammons, 1996; Акинфиев, Зотов, 2001, и др.]. Данное направление исследований разрабатывается в течение нескольких десятилетий. Их результаты открывают перспективы исследований связи условий переноса и отложения благородных металлов с составом природных гидротермальных растворов и парагенетическими минеральными ассоциациями руд конкретных месторождений в пределах диапазонов изменения температуры, давления и летучести серы, кислорода и других газообразных компонентов. Теоретические основы и методы определения температуры и давления перечисленных летучих компонентов в период об-

разования руд достаточно подробно излагаются в литературе. Примеры, где выполнены данные исследования, охватывают жильные сульфидные золоторудные и золотосодержащие гидротермальные месторождения сурьмы, свинца, вольфрама и других металлов, а также золотосодержащие медно-порфировые и колчеданные месторождения, в связи с чем, мы не останавливаемся на этих вопросах.

Оценить относительный вклад органической и неорганической составляющей рудного вещества черносланцевых месторождений в настоящий момент представляется затруднительным. Данные механизмы переноса благородных металлов, по-видимому, дополняют друг друга. При наличии заметных количеств органического вещества и, в первую очередь, компонентов, способных образовывать соединения с благородными металлами, возможен перенос и концентрирование благородных металлов в виде элементоорганических соедине-

Таблица 3

Содержания редких и благородных металлов
в углеродистых сланцах Ишеримского антиклинория, (г/т)

Элементы	№ анализа					
	1	2	3	4	5	6
Ge	16,91325	13,15800	14,11875	13,48200	16,06725	–
As	11,73375	6,03225	6,85575	6,12675	4,88250	–
Ru	0,02250	0,01800	0,02925	0,01350	0,01575	–
Rh	0,00675	0,00900	0,01125	0,00450	0,00675	< 0,005
Pd	3,19500	1,36350	2,58300	6,30000	2,46375	–
Ag	1,14525	0,49275	0,86175	2,18475	0,86400	–
Cd	0,17325	0,07200	0,10800	0,10125	0,13725	–
In	0,07875	0,02475	0,05850	0,07650	0,06525	–
Sn	3,73950	1,65600	2,76975	3,35700	3,06225	–
Sb	0,09450	0,15525	0,11250	0,34425	0,06525	–
Te	0,05400	0,03600	0,03600	0,04500	0,04725	–
Ta	0,03375	0,17550	0,05625	0,06975	0,02700	–
Os	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	–
Ir	0,01800	0,00900	0,01800	0,04500	0,01575	–
Pt	0,11025	0,05400	0,09450	0,22725	0,09225	1,74
Au	0,02250	0,00450	0,01350	0,02025	0,01575	3,08
Hg	0,07875	0,10125	0,05175	0,05175	0,04275	–
W	1,41525	1,91925	0,93825	0,97200	0,66150	–
Re	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	–
Tl	0,70650	0,13050	0,40500	0,74475	0,65025	–
Pb	9,18225	3,75525	8,24175	6,94575	13,92075	–
Bi	0,16425	0,04050	0,14400	0,11925	0,22725	–
Th	0,03375	0,17550	0,05625	0,06750	0,02700	–
U	5,24025	6,14475	2,06325	2,28825	2,64825	–

Примечание. Анализы 1-5 выполнены методом ICP-MS в ИГГ УрО РАН (рук. аналитической группы Ю.Л. Ронкин); 6 – пробирно-атомно-абсорбционным методом в лаборатории ЦНИГРИ. Источник – [Тектоническое..., 2006].

Средние содержания благородных металлов
по наиболее перспективным рудоносным площадям

Рудоносные площади	Au	Pt	Pd	Pt/Pd
Даньковская	4,4	0,21	0,47	0,2-0,53
Кедровская	2,18	0,9	0,45	0,8-7,5
Леневская (Регина-Настасьинская)	1,0	2,47	0,9	1,5-5,0
Сурьинская зона Вагранской площади	1,2	0,6	0,8	0,75
Оленевская зона Вагранской площади	1,9	0,9	0,4	2,25

ний. Косвенным подтверждением данного предположения является корреляция содержания сульфидной серы и органического углерода в черносланцевых толщах с золото-платиновым оруденением [Буряк, 2000]. Тем не менее, «напрямую» эта связь далеко не везде проявляется, что, вероятно, связано со сложным, многокомпонентным набором органических веществ, которые различаются по степени устойчивости в процессах последующих метаморфических преобразований и, как показано выше, способны генерировать активные группы, образующие летучие соединения с благородными металлами [Варшал и др., 1994].

Полученные результаты показывают необходимость учета органической составляющей не только в процессе аналитических операций, но и при оценке перспектив наличия благородных металлов для известных и вновь открываемых рудопроявлений, связанных с углеродсодержащими породами. Не исключено, что широко используемые методы анализа на золото приводят к занижению его содержания в рудах. Очевидно, что в определенной степени это относится и к платиноидам. Вполне возможно, что данные металлы могут присутствовать и в рудах стратиформных Саурейского барит-полиметаллического и Амурского полиметаллического месторождений, залегающих в углеродсодержащих породах, не говоря о ряде других рудопроявлений, близких им по составу и условиям локализации. Основанием данного предположения является то, что в подстилающих рудовмещающих толщах и перекрывающих рудоносные горизонты породах отмечаются углеродсодержащие образования [Широбокова, 1992]. Наряду с этим, в мономинеральных фракциях галенита и сфалерита Верхне-Аршинского месторождения (северо-восточная часть Башкирского поднятия) были обнаружены золото и платиноиды [Осетров, 1957]. Выполненные в последнее время исследования

руд названных месторождений Урала показали перспективность обнаружения в них промышленных содержаний благородных металлов [Гурская, 2000].

Итак, черносланцевые проявления Урала, по сравнению с колчеданами, обнаруживают отчетливую специализацию на палладий и платину. Содержания палладия и платины в рудах колчеданных месторождений примерно на порядок ниже, чем для проявлений связанных с черными сланцами. Тем не менее, соотношение приведенных к мантийному или метеоритному стандартам, концентраций этих элементов сохраняется. Из этого следует, что наиболее вероятным источником поступления палладия и платины могли быть основные породы. Исходя из данных изотопного состава свинца галенитов, источником поступления свинца и тесно связанного с ним золота могли быть погружающиеся в зоне субдукции породы континентальных окраин, о чем подробнее будет сказано ниже.

Для понимания механизма накопления благородных металлов особый интерес представляют данные о распределении их примесей в рудообразующих сульфидах, сульфоарсенидах и сульфосолях, которыми мы располагаем преимущественно для колчеданных месторождений. Исследования состава рудных минералов черносланцевых месторождений Урала пока находятся в начальной стадии, поэтому нами в определенной степени привлекаются материалы, полученные на месторождениях других регионов, близких по условиям образования и набору рудных компонентов. Результаты исследований распределения примесей благородных металлов в сульфидах, а также состава их собственных минералов из месторождений и проявлений, которые относятся к черносланцевому генетическому типу, показаны в табл. 5, 6. Особое внимание привлекает наличие примесей благородных металлов в пирите

Таблица 5

Химический состав рудных минералов углеродсодержащих сланцев, содержащих примеси благородных металлов

Проба, образец	Минерал	Cu	S	As	Fe	Zn	Co	Ni	Sb	Ag	Au	Pd	Pt	Сумма
Сурьинский участок														
Kc-13 – 30.1 (1)	FeS ₂	0,11	53,73	0	45,57	–	0	0	–	0	0	0	0	99,41
Kc-13 – 30.1 (1)		0,03	52,28	0	44,68	–	0	0	–	0	0	0	0,09	97,09
Kc-21 – 74.5 (1)		0	52,98	0	45,99	–	0	0	–	0	0,06	0,02	0,01	99,07
Kc-21 – 74.5 (1)		0	52,6	0	45,57	–	0,02	1,07	–	0	0,04	0,09	0	99,39
Kc-23 – 45.2 (1)		0	52,35	0	46,54	–	0,51	0,64	–	0,05	0	0,02	0,07	100,18
Kc-23 – 45.2 (2)		0,02	53,87	0	47,10	–	0,02	0	–	0,01	0	0,01	0,03	101,07
Kc-23 – 45.2 (3)		0	51,89	0	45,27	–	0	0	–	0	0	0	0,05	97,23
Kc-26 – 38.1 (1 - 6)		0,01	52,6	0,01	46,66	–	0,01	0	–	0	0	0	0,04	99,34
Kc-26 – 38.1 (2 - a)		0,22	52,16	0,02	44,79	–	0,22	0,05	–	0,07	0,01	0,02	0,03	97,56
Kc-23 – 45.2 (4)		(Co,Ni,Fe)AsS (Ni,Fe,Co)AsS	–	18,95	44,92	7,46	–	18,91	10,17	0	0	0,01	0	0
Kc-26 – 38.1 (1 - a)	–		18,15	45,82	10,07	–	6,52	18,14	0	0,05	0	0	0	98,76
Kc-26 – 38.1 (2 - 3)	–		18,26	45,2	11,04	–	3,32	21,99	0	0,04	0	0	0	99,85
Kc-26 – 38.1 (2 - 4)	–		18,15	46,44	11,45	–	3,93	20,1	0	0,05	0	0	0	100,12
Kc-21 – 74.5	ZnS		0,03	32,21	0	0,53	71,17	–	–	0	0	0	0,06	0
Оленевский участок														
Kc-20 – 30.5 (2)	FeS ₂	0	53,60	0	47,57	–	0,03	0,02	–	0,02	0,06	0,01	0,12	101,43
Kc-20 – 74.8	Fe _{1-x} S	–	34,83	–	63,03	–	0,01	0,31	–	0,03	0	0	0	101,43
Kc-20 – 74.8	(Ni,Fe) ₉ S ₈	0	30,67	–	31,4	–	0,05	34,65	–	0,03	0	0	0,01	96,9
Kc-20 – 74.8 (1)	(Ni,Fe,Co)AsS	–	17,85	45,24	7,65	–	2,97	26,65	0	0,03	0	0	0,1	100,49
Kc-20 – 74.8 (2)		–	17,97	47,21	8,21	–	0,15	27,78	0	0,01	0,07	0	0,04	101,44

Примечание. Анализы выполнены методом РСМА, аналитик В.Н. Осиповских. Анализы минералов Сурьинского участка выполнялись на матеериале проб, полученных из обогащенной фракции 71-37 мкм. Примесь кадмия в сфалерите не обнаружена. Источник – [Тектоническое ..., 2006].

Здесь и далее в таблицах состава минералов: ZnS – сфалерит; FeS₂ – пирит; Fe_{1-x}S – пирротин; (Ni, Fe)₉S₈ – пентландит; (Ni, Fe, Co)AsS – герсдорфит; Fe, Co-содержащий; FeAsS – арсенопирит; (Co, Ni, Fe)AsS – кобальтин, Ni, Fe-содержащий; CuFeS₂ – халькопирит; CuS – ковеллин; PbS – галенит; Tn-Ir – блеклые руды теннантит-тетраэдритового ряда; Cu₃BiS₃ – виттихенит; CuPbBiS₂ – айкинит; Cu₃FeS₄ – борнит.

Таблица 6

Результаты анализа рудных минералов из углеродсодержащих сланцев Сурьинского и Оленевского участков

Участок	№ образца	Минерал	Cu	S	As	Fe	Pb	Co	Ni	Rh	Pd	Au	Ag	Сумма
Сурьинский	Кс21-74.5	(Ni,Fe,Co)AsS	Сл.	20,29	0,0	8,55	0,0	8,92	18,11	0,0	0,10	Сл.	0,0	99,5
		FeS ₂	0,0	53,60	–	47,10	0,0	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,73
			0,0	52,86	0,0	47,13	0,0	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,02
		(Ni,Fe,Co)AsS	Сл.	20,45	43,28	8,17	0,0	9,73	18,20	0,0	0,12	0,0	0,0	100,00
Оленевский	Кс20-81.6	FeS ₂	0,0	53,74	0,0	46,32	0,0	0,07	Сл.	0,0	0,0	0,0	0,0	100,13
		(Ni,Fe) ₉ S ₈	0,0	33,84	0,0	27,71	0,0	1,65	35,89	0,0	0,10	0,0	0,0	99,19
		Fe _{1-x} S	0,0	39,20	0,0	60,78	0,0	0,03	0,42	0,03	0,10	0,0	0,0	100,56
		(Ni,Fe) ₉ S ₈	0,0	40,45	0,0	20,27	0,0	1,67	37,26	0,0	0,10	0,0	0,0	99,74
		Fe _{1-x} S	0,0	39,81	0,0	60,01	0,0	0,03	0,34	0,03	0,10	0,0	0,0	100,32
		(Ni,Fe) ₉ S ₈	0,0	33,39	0,0	27,75	0,0	1,87	37,12	0,0	0,11	0,0	0,0	100,72
	Кс20-81.6	Fe _{1-x} S	0,0	41,19	0,0	58,28	0,0	0,03	0,16	0,03	0,10	0,0	0,0	99,79
		PbS	0,0	13,81	0,0	1,31	82,37	0,44	0,58	0,0	0,21	0,25	0,40	99,37
		Fe _{1-x}	0,0	39,62	0,0	60,01	0,0	0,13	0,16	0,03	0,10	0,0	0,0	100,05
		PbS	0,01	14,06	0,0	1,05	82,52	0,40	0,57	0,0	0,23	0,22	0,50	99,56
	Кс17-68.1	Fe _{1-x} S	0,0	39,79	0,0	59,51	0,0	0,19	0,15	0,03	0,07	0,0	0,0	99,77
		PbS	0,02	13,64	0,0	2,27	81,80	0,44	0,54	0,0	0,23	0,24	0,50	99,61
		Fe _{1-x} S	0,0	39,60	0,0	59,51	0,0	0,17	0,11	0,03	0,10	0,0	0,0	99,52
		FeS ₂	0,08	53,68	0,0	46,73	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,50
	Кс20-18.4		0,11	53,40	0,0	46,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,92
			0,03	53,37	0,0	46,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,40
			0,06	53,81	0,0	45,80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,67
			0,03	53,41	0,0	45,97	0,0	0,0	0,30	0,0	0,05	0,0	0,0	99,75
	Кс19-30.7		0,14	53,40	0,0	45,76	0,0	0,0	0,22	0,0	0,05	0,0	0,0	99,58

Примечание. Анализы выполнены в ИГТ УрО РАН, аналитик Л.К. Воронина. Источник – [Тектоническое..., 2006].

Таблица 7

Химический состав рудных минералов колчеданных месторождений, содержащих примеси благородных металлов

Проба	Минерал	Cu	S	As	Fe	Pb	Zn	Bi	Sb	Te	Se	Hg	Ag	Au	Pd	Pt	Сумма
Александринское месторождение																	
2267	Tn-Td	43,00	27,62	15,07	1,33	—	7,38	—	5,25	0,00	—	0,00	0,00	—	0,38	—	100,05
Сафьяновское месторождение																	
0152/137,7	Tn-Td	39,18	25,56	4,15	2,06	0,08	7,50	1,20	22,16	0,00	0,03	—	0,10	0,00	0,05	0,00	100,07
		46,50	31,52	17,71	0,62	0,89	0,36	0,00	1,04	0,00	0,00	—	0,19	0,00	0,00	0,00	98,83
0152/72,6		47,41	31,64	17,43	0,94	0,35	0,40	0,00	0,51	0,00	0,00	—	0,00	0,00	0,00	0,00	98,83
		44,27	32,43	16,97	3,94	0,08	2,75	0,00	0,27	0,00	0,04	—	0,02	0,00	0,00	0,05	100,82
2119/446,3		46,56	32,78	18,21	3,19	0,23	0,21	0,00	0,23	0,02	0,05	—	0,00	0,00	0,04	0,06	101,58
		32,15	18,87	0,00	0,45	0,70	2,13	41,99	0,09	0,27	1,02	0,19	1,78	0,00	0,07	0,15	99,86
2149/126,0	Cu ₃ BiS ₃	11,20	17,14	0,00	0,11	36,79	0,00	32,58	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,05	0,07	0,00	98,38
	CuPbBiS ₂	11,10	16,69	0,00	0,01	36,54	0,05	34,21	0,00	0,00	0,32	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	98,97
0152/137,7		11,14	16,95	0,00	0,34	36,75	0,00	36,73	0,00	0,07	0,36	—	0,00	0,18	0,00	0,00	102,52
		11,69	16,50	0,00	0,50	36,99	0,00	36,92	0,03	0,00	0,18	—	0,18	0,00	0,00	0,02	102,83
2151/212	FeAsS	1,71	19,10	48,48	29,80	—	0,07	0,00	0,05	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	100,15

из Оленевского и Сурьинского участков (табл. 5). Приведенные данные, вероятно, являются предварительными, поскольку не характеризуется методика их получения с помощью рентгеноспектрального микроанализа РСМА. Более определенные результаты приведены в табл. 6. Исходя из этих данных, можно заключить, что для рассматриваемых участков намечается тенденция повышения содержаний примесей платиноидов в сульфоарсенидах по сравнению с пиритом. К сожалению, и в этом случае неизвестны особенности используемой методики определения примесей платиноидов в данных минералах с помощью локального рентгеноспектрального микроанализа.

Из литературы известно, что сульфоарсениды никеля и кобальта (сюда же можно добавить арсенопирит) являются одной из ведущих минеральных форм концентрации золота и платиноидов. Данная тенденция прослеживается на магматическом и гидротермальном уровнях. Впервые способность сульфоарсенидов накапливать примеси платиноидов в большей степени, чем сульфиды меди, железа и никеля была установлена в рудах медно-никелевых месторождений, а также рассеянной минерализации генетически связанных с ними интрузивов Кольского полуострова [Дистлер, Лапутина, 1979]. Она подтвердилась современными исследованиями сульфидов и сульфоарсенидов из руд и проявлений массива горы Генеральской, Кольский п-ов [Barkov et al., 1999].

Перейдем к гидротермальным месторождениям. Высокоточные измерения содержания примесей рения и осмия в пирите и арсенопирите из месторождения Азулес (палеозойские Центральные Анды, СЗ Аргентины) с целью определения их возраста рений-осмиевым методом показали более высокие концентрации осмия и рения в арсенопирите по сравнению с пиритом [Bierlein et al., 2006]. Эта же тенденция подтвердилась на месторождении Бендигго, центральная Виктория, Австралия [Arne et al., 2001]. Предпочтительное накопление золота в арсенопирите по сравнению с пиритом прослеживается в рудах карлинского и близкого к нему типов [Ashley et al., 2000].

По всей видимости, арсенопирит является одним из золотосодержащих минералов и в рудах колчеданных месторождений. На данный момент мы располагаем единичными определениями концентрации золота в арсенопирите и косвенными доказательствами этой его роли,

Таблица 8

Химический состав блеклых руд халькопиритовой фации колчеданных месторождений

Месторождение	Образец	Cu	S	As	Fe	Pb	Zn	Bi	Sb	Te	Se	Hg	Ag	Au	Pd	Pt	Сумма
Молодежное	46/86	41,54	27,16	17,30	1,50	0,00	6,94	0,17	4,31	0,00	0,10	0,00	0,07	0,00	—	—	99,09
		41,69	27,42	17,95	1,57	0,00	6,62	0,16	3,01	0,00	0,08	0,00	0,05	0,03	—	—	98,85
	6/91 м.1	40,21	26,63	14,97	3,12	0,00	5,71	0,41	7,13	0,03	0,15	0,00	0,03	0,00	—	—	98,39
		39,80	27,23	15,20	3,13	0,00	5,69	0,62	7,08	0,00	0,12	0,09	0,14	0,00	—	—	99,10
		40,50	27,31	16,47	3,42	0,00	5,93	0,37	5,35	0,00	0,13	0,00	0,06	0,00	—	—	99,54
	100/89	38,13	27,25	8,94	0,96	0,00	6,47	0,21	16,48	0,00	0,08	0,22	0,48	0,11	—	—	99,33
		38,66	27,53	10,31	1,10	0,00	6,51	0,34	14,14	0,00	0,04	0,05	0,37	0,00	—	—	99,05
		39,05	27,57	10,21	0,91	0,00	6,57	0,22	14,77	0,00	0,02	0,00	0,58	0,00	—	—	99,90
	118/90	39,48	27,29	10,94	1,13	0,00	6,76	0,00	13,39	0,00	0,04	0,32	0,53	0,02	—	—	99,90
		38,18	27,45	12,41	2,69	0,00	6,21	0,17	11,25	0,00	0,08	0,00	0,47	0,11	—	—	99,02
		38,57	27,15	12,57	2,08	0,00	6,17	0,00	11,94	0,00	0,03	0,31	0,41	0,00	—	—	99,23
	122/90	40,20	27,66	13,46	3,37	0,00	3,81	0,13	9,46	0,00	0,05	0,14	0,71	0,05	—	—	99,04
Узельгинское	24/88	41,21	28,25	18,48	1,86	0,00	6,29	0,28	2,56	0,04	0,07	0,00	0,05	0,00	—	—	99,09
		39,06	27,46	19,70	4,84	0,00	5,44	0,23	1,72	0,00	0,05	0,00	0,09	0,05	—	—	98,64
	131/87	40,57	28,17	16,87	1,83	0,00	6,20	0,21	4,73	0,00	0,29	0,11	0,05	0,15	—	—	99,18
	46/88	41,10	29,20	18,34	1,33	0,00	6,84	0,25	2,51	0,00	0,06	0,22	0,01	0,00	—	—	99,86
		37,94	25,34	3,32	0,93	0,08	7,30	2,55	22,66	0,00	0,06	—	0,00	0,03	0,00	0,00	99,19
	Уз-424/78	40,13	26,91	12,98	1,36	0,00	6,96	0,00	11,12	0,17	0,04	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	99,74
		38,18	26,52	12,20	0,90	0,00	9,97	0,00	11,89	0,17	0,00	0,25	0,07	0,00	0,00	0,00	100,15
		39,05	26,35	12,78	0,87	0,00	9,20	0,00	10,87	0,25	0,06	0,31	0,07	0,00	0,06	0,00	99,87
	Уз-405/78	39,16	27,03	16,72	1,52	0,00	7,76	0,00	7,06	0,13	0,06	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00	95,53
	Им. III Интернационала	41,92	26,75	20,10	1,02	0,00	7,47	0,00	2,09	0,20	0,09	0,00	0,45	0,00	0,03	0,00	100,12

которые следуют из микроскопических наблюдений золотосодержащих руд. Так, на месторождении им. III Интернационала (обр. 1249-И) отмечается появление мелких выделений самородного золота в пленочных выделениях теннантита, которые замещают идиоморфные зерна арсенопирита [Викентьев и др., 2006]. Мы пока располагаем единственным анализом арсенопирита, который показал наличие в нем примеси платины (табл. 7). После арсенопирита, одним из наиболее значимых концентраторов золота в сульфидных рудах являются минералы группы блеклых руд [Cook, Chrysosoulis, 1990]. С учетом часто наблюдаемого замещения ими арсенопирита можно заключить, что геохимическая связь золота и мышьяка в колчеданных рудах сохраняется при их метаморфических преобразованиях, несмотря на изменение минеральных форм нахождения мышьяка в рудах. Как следует из данных по составу блеклых руд, приведенных в табл. 7, 8, данные минералы способны накапливать примеси благородных металлов.

Наряду с блеклыми рудами, примеси золота и платиноидов отмечаются в таких распространенных рудных минералах колчеданных месторождений, как пирит, халькопирит и галенит. Из перечисленных минералов примеси благородных металлов предпочтительнее накапливаются в галените (табл. 9, 10). Отметим, что, вплоть до появления публикаций А.Г. Миронова с соавторами [2004; 2008], возможность накопления примесей платиноидов в галенитах практически не рассматривалась. Упомянутые работы представляют особый интерес в связи с тем, что определения благородных металлов в валовых пробах полиметаллических руд, включая их определение в галенитах, выполнено разработчиками современных методик анализа платиноидов в рудах. В качестве возможного носителя золота и платиноидов нами также был исследован сфалерит из руд халькопиритовой фации, анализы которого приведены в табл. 11. В отличие от рассмотренных выше минералов, сфалериты обеднены примесями золота и палладия (платина не анализировалась). Эти результаты на первый взгляд не согласуются с данными по содержанию золота в современных подводных сульфидных гидротермальных постройках, где наиболее высокие его содержания отмечаются в трубах, обогащенных цинком и барием [Iizasa et al., 1999; Moss, Scott, 2001]. Руды исследуемых нами

месторождений прошли перекристаллизацию в процессе метаморфических изменений, которые приводили к очищению сфалеритов, как и остальных сульфидов, от включений и примесей [Молошаг и др., 2004].

Анализы сульфидов из борнитовых руд Гайского месторождения показывают наличие в них примесей платины, палладия и золота (табл. 10). Выяснение физической формы присутствия золота в сульфидах находится вне пределов возможностей применяемых нами методик, включая не рассматриваемые в предлагаемой статье результаты рационального анализа. Решение данной проблемы требует постановки специальных исследований. Возможно, что некоторая часть золота структурно связана с кристаллической решеткой борнита и теннантита. Для изоморфной примеси серебра в минералах в порядке увеличения его содержания намечаются следующие последовательности: галенит-блеклые руды-борнит для борнитовой фации и галенит-блеклые руды для халькопиритовой фации. Сингенетичные борниту блеклые руды отличаются относительно низким содержанием серебра. Очевидно, это связано с перераспределением примеси серебра между блеклыми рудами и борнитом в условиях борнитовой фации. На примере Гайского месторождения нами было обнаружено, что концентрации серебра в борните выше, чем в блеклых рудах [Молошаг, Викентьев, 2007]. Распределение примесей серебра между данными минералами приближается к равновесному. В борните и теннантите обнаружены также примеси золота до 0,12, палладия – до 0,13 и платины – до 0,12 мас. %. Основная часть золота в данных минералах, вероятно, присутствует в виде тонкодисперсных, субмикроскопических включений и сростков. В пользу этого говорит большой разброс полученных значений содержания золота и платиноидов.

Присутствие золота в борнитовых рудах в виде субмикроскопических выделений, вплоть до видимых включений самородного золота в сульфидах и сростков с ними, связано с перекристаллизацией сульфидов при метаморфических преобразованиях руд. Наряду с этим, исследования форм нахождения золота в современных субмаринных колчеданных постройках показали наличие химически связанного с сульфидами золота [Бортников и др., 2003]. Такое золото, очевидно, преобладает в слабо метаморфизованных древних колчеданных рудах.

Таблица 9

Химический состав сульфидов из руд халькопиритовой фации колчеданных месторождений

Образец	Минерал	Cu	S	As	Fe	Pb	Zn	Bi	Sb	Te	Se	Hg	Ag	Au	Pd	Pt	Сумма	
Узельгинское месторождение																		
V-424/78	FeS ₂	0,00	53,94	0,00	45,55	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	100,17	
		0,04	53,85	0,03	45,42	0,00	0,14	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,05	0,00	0,07	0,12	100,03
	PbS	1,38	12,69	0,00	0,83	83,45	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,15	0,00	0,00	0,12	0,00	100,55
		0,00	12,14	0,00	0,00	83,60	2,50	0,00	0,00	0,00	0,09	1,36	0,05	0,11	0,00	0,00	0,03	99,88
		0,04	12,47	0,00	0,02	83,17	3,91	0,00	0,00	0,00	0,10	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,76
	CuFeS ₂	0,22	12,88	0,00	0,25	84,75	0,13	0,00	0,00	0,14	1,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,22	100,18	
		34,09	35,00	0,12	29,10	0,00	1,12	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	99,49	
		33,72	34,90	0,03	28,65	0,00	1,77	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,11	0,00	0,02	0,00	99,23	
Молодежное месторождение																		
46/86	PbS	0,05	13,33	0,00	0,01	85,93	0,04	0,12	0,03	0,09	0,31	0,00	0,12	0,09	—	—	100,12	
100/89	PbS	0,16	13,53	0,00	0,01	85,81	0,09	0,31	0,00	0,04	0,00	0,05	0,09	0,00	—	—	100,09	
		0,42	13,44	0,00	0,00	86,04	0,08	0,10	0,00	0,08	0,04	0,14	0,02	0,11	—	—	100,47	
		1,35	13,42	0,00	0,03	84,28	0,28	0,12	0,00	0,04	0,00	0,46	0,02	0,00	—	—	100,00	
118/90	PbS	0,03	13,40	0,00	0,05	85,59	0,05	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	—	—	99,30	
		0,02	13,38	0,00	0,21	85,33	0,09	0,00	0,00	0,00	0,05	0,07	0,06	0,04	0,12	—	99,37	
Сафьяновское месторождение																		
0152/137/7	CuFeS ₂	34,26	34,37	0,00	28,99	0,23	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	—	0,00	0,00	0,00	0,00	97,92	
2149/129/6	CuFeS ₂	34,74	34,44	0,00	29,47	0,14	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00	—	0,02	0,00	0,03	0,04	98,97	
		34,58	34,67	0,09	29,32	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,00	0,00	0,00	0,00	98,86	
2149/126.0	PbS	0,00	13,35	0,00	0,00	86,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	—	0,00	0,00	0,00	0,05	99,75	
		0,03	13,34	0,00	0,00	87,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	—	0,00	0,00	0,10	101,14	
2074/95.8	CuS	74,37	25,29	0,00	0,57	0,24	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	—	0,10	0,00	0,06	0,05	100,72	
		72,80	26,91	0,23	0,63	0,09	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	—	0,00	0,02	0,00	0,17	100,94	
Месторождение им. III Интернационала																		
III-1524	FeS ₂	0,05	53,29	0,00	46,59	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,07	0,00	0,10	0,10	100,53	

Таблица 10

Химический состав сульфидов из руд борнитовой фации Гайского месторождения

Проба, образец	Минерал	Cu	S	As	Fe	Pb	Zn	Bi	Sb	Te	Se	Hg	Ag	Au	Pd	Pt	Сумма
I-754-3	Cu ₅ FeS ₄	62,12	26,14	0,03	10,87	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,55	0,14	0,00	0,00	99,90
		62,68	26,19	0,00	10,50	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07	0,04	0,00	0,48	0,11	0,00	0,16	100,26
		62,58	25,96	0,06	10,45	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,41	0,10	0,07	0,00	99,65
		61,33	26,66	0,11	11,16	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,10	0,03	0,00	99,73
754/3		61,95	26,20	0,07	11,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,07	0,00	0,11	100,00
		62,24	25,99	0,09	11,08	0,00	0,14	0,00	0,02	0,00	0,03	0,04	0,16	0,06	0,03	0,00	99,88
		61,27	26,01	0,00	11,83	0,17	0,14	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,41	0,00	0,00	0,03	99,94
		60,20	25,93	0,04	12,39	0,54	0,02	0,00	0,02	0,00	0,11	0,00	0,33	0,17	0,00	0,00	99,79
I-523/76		60,97	26,30	0,00	11,33	0,06	0,10	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,07	0,02	0,00	99,55
		60,70	26,40	0,00	11,74	0,47	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	100,12
		35,08	34,98	0,07	29,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00	99,56
		0,49	12,90	0,00	0,26	84,86	0,00	0,00	0,00	0,02	0,22	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	98,82
754/3	PbS	0,69	13,19	0,00	0,00	85,22	0,18	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,11	0,41	0,07	0,24	100,15
		2,63	12,68	0,00	0,00	83,16	0,65	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,06	0,20	0,13	0,00	99,55
		42,53	26,60	21,05	0,22	0,00	8,04	0,00	0,60	0,05	0,03	0,11	0,14	0,00	0,00	0,26	99,63
		39,37	26,31	8,50	0,99	0,00	7,05	0,00	17,01	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00	0,03	0,00	100,16
I-523/76	Td	38,97	26,39	9,30	1,30	0,00	7,05	0,00	17,00	0,00	0,07	0,02	0,15	0,00	0,00	0,00	99,36
I-754/3	Tn	42,39	27,94	20,62	0,16	0,00	7,74	0,00	0,70	0,23	0,05	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	100,03
		42,38	27,88	20,38	0,21	0,00	7,70	0,00	0,47	0,12	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,37

Таблица 11

Колчеданные месторождения. Халькопиритовая фация. Химический состав сфалеритов

Месторождение	Проба, образец	Cu	S	As	Fe	Mn	Zn	Bi	Cd	In	Ge	Hg	Ag	Au	Pd	Сумма
Им. III Интернационала	III-1367	—	32,95	0,01	1,79	0,02	65,12	—	0,04	—	—	—	—	0,00	0,00	99,92
		—	32,99	0,02	1,28	0,04	65,01	—	0,19	—	—	—	—	0,00	0,06	99,59
		—	33,28	0,03	1,31	0,00	65,18	—	0,18	—	—	—	—	0,00	0,00	99,98
	III-723	—	32,79	0,00	0,43	0,00	66,03	—	0,23	—	—	—	—	0,00	0,00	99,48
		—	32,23	0,00	0,48	0,02	66,63	—	0,18	—	—	—	—	0,00	0,03	99,57
		—	32,51	0,04	0,46	0,02	66,13	—	0,15	—	—	—	—	0,00	0,00	99,31
	III-715	—	32,56	0,02	0,46	0,00	66,28	—	0,21	—	—	—	—	0,00	0,00	99,53
		—	32,72	0,04	0,61	0,00	65,53	—	0,23	—	—	—	—	0,00	0,05	99,18
	III-803	—	33,25	0,05	1,41	0,00	65,17	—	0,21	—	—	—	—	0,00	0,00	100,09
		—	33,10	0,00	0,87	0,00	65,81	—	0,12	—	—	—	—	0,00	0,02	99,92
	III-1425	—	33,26	0,00	0,00	0,02	66,32	—	0,16	—	—	—	—	0,00	0,00	99,76
		—	33,41	0,00	0,04	0,00	65,97	—	0,21	—	—	—	—	0,00	0,00	99,63
Сафьяновское	III-1524	—	32,86	0,07	0,49	0,02	65,70	—	0,33	—	—	—	—	0,00	0,00	99,47
		—	32,51	0,00	0,37	0,00	65,62	—	0,29	—	—	—	—	0,00	0,00	98,79
		—	33,11	0,08	0,55	0,21	65,22	—	0,19	—	—	—	—	0,08	0,00	99,44
	III-712/2	—	33,27	0,00	0,66	0,20	65,74	—	0,23	—	—	—	—	0,00	0,02	100,12
		—	33,37	0,02	0,38	0,03	65,98	—	0,34	—	—	—	—	0,05	0,00	100,17
		—	33,02	0,00	0,13	0,01	66,37	—	0,45	—	—	—	—	0,00	0,00	99,98
	IV-2149/126	—	33,34	0,00	0,11	0,02	66,23	—	0,43	—	—	—	—	0,03	0,00	100,16
		—	32,95	0,03	0,71	0,00	64,25	—	0,21	—	—	—	—	0,00	0,02	98,17
		—	33,31	0,00	0,75	0,02	64,59	—	0,20	—	—	—	—	0,09	0,08	99,04
	V-405/78	—	33,25	0,02	0,15	0,00	65,89	—	0,31	—	—	—	—	0,03	0,02	99,67
		—	32,97	0,00	2,71	0,02	62,84	—	0,33	—	—	—	—	0,00	0,02	98,89
		—	32,90	0,00	0,25	0,00	65,76	—	0,22	—	—	—	—	0,03	0,00	99,16
Узельгинское	V-418/78	—	33,03	0,05	0,74	0,04	64,93	—	0,20	—	—	—	—	0,00	0,00	98,99
		—	32,86	0,00	0,60	0,00	64,95	—	0,22	—	—	—	—	0,00	0,00	98,63
		—	32,91	0,00	1,30	0,00	65,54	—	0,20	—	—	—	—	0,00	0,00	99,95
	V-418/78	—	32,62	0,00	1,31	0,01	64,69	—	0,20	—	—	—	—	0,00	0,01	98,86
		—	33,26	0,00	0,10	0,00	65,57	—	0,30	—	—	—	—	0,00	0,00	99,23
		—	33,10	0,00	0,77	0,00	64,95	—	0,22	—	—	—	—	0,04	0,00	99,12

Окончание таблицы 11

Месторождение	Проба, образец	Cu	S	As	Fe	Mn	Zn	Bi	Cd	In	Ge	Hg	Ag	Au	Pd	Сумма
Узельгинское	V-424/78	0,07	33,04	0,00	0,13	0,02	66,30	0,00	0,15	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,02	99,96
		0,05	32,73	0,00	0,66	0,00	66,10	0,00	0,16	0,00	0,04	0,15	0,00	0,00	0,00	99,89
		0,07	32,45	0,00	0,08	0,00	66,58	0,00	0,15	0,00	0,18	0,08	0,00	0,02	0,00	99,61
		0,03	32,88	0,18	0,11	0,03	65,96	0,00	0,13	0,00	0,04	0,04	0,00	0,35	0,03	99,75
		0,00	32,68	0,00	0,09	0,01	66,31	0,00	0,23	0,02	0,00	0,32	0,06	0,37	0,01	100,09
		0,08	32,80	0,00	0,12	0,00	66,45	0,03	0,20	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	99,71
		0,00	32,77	0,03	0,14	0,03	66,14	0,00	0,16	0,00	0,02	0,06	0,10	0,00	0,03	99,45
		0,01	32,81	0,00	0,10	0,02	66,50	0,15	0,21	0,00	0,10	0,09	0,06	0,00	0,02	100,05
		0,00	32,66	0,08	0,16	0,03	66,25	0,13	0,06	0,02	0,04	0,04	0,00	0,04	0,03	99,64
	V-404/78															

Полученные нами результаты по определению содержания примесей благородных металлов в рудообразующих сульфидах с помощью электронного микрорентгеноспектрального (микророндового) анализа являются предварительными. Это связано с тем, что, по техническим причинам, нами еще не набран статистически представительный материал. В тех случаях, когда это возможно, полученные с помощью микророндового анализа определения содержания примесей благородных металлов находятся в пределах $(0,001-0,1)n$ мас. %, где n — целое число. Из полученных результатов и литературных данных следует, что при наличии эталонных проб, анализ которых выполнен с помощью других методов, о чем было сказано выше, рентгеноспектральный микроанализ можно использовать для определения примесей благородных металлов в рудных минералах.

Исследованиями геохимии золота в рудах колчеданных месторождений установлено присутствие золота во всех промышленных типах руд при максимальном его содержании в медно-цинковых рудах. Увеличение содержания золота в рудах сопровождается повышенными содержаниями серебра, мышьяка и свинца (табл. 12). Для колчеданных месторождений Урала общеизвестным фактом является присутствие повышенных содержаний золота, мышьяка и свинца в медно-цинковых рудах. В тех случаях, когда содержания последнего представляют промышленный интерес, выделяются колчеданно-полиметаллические месторождения, в частности месторождения баймакского типа [Медноколчеданные..., 1985]. Геохимическая связь золота со свинцом и мышьяком в колчеданных рудах Урала прослеживается и на минералогическом уровне, поскольку выделения видимого золота в рудах часто ассоциируют с галенитом и блеклыми рудами.

Для интерпретации связи золота в рудах со свинцом, медью и мышьяком использовались литературные данные по изотопному составу рудного свинца и результаты экспериментальных исследований по условиям переноса свинца, золота и мышьяка в надкритических водных растворах, о чем будет сказано ниже. Изотопные исследования свинца проводились по галенитам, которые отбирались из руд месторождений Тагильской и Магнитогорской мегазон Урала, представляющих главные минеральные и возрастные группы, включая крупные Сибайское, Учалинское и суперкрупное Гайское, а также еще восемь среднемасштаб-

Содержание основных рудообразующих компонентов
в рудах колчеданных месторождений Урала

Компоненты	Сафьяновское		Гайское		Майское	Бакр-Тау
	МР	МЦР	МР	МЦР	МЦР	МЦР
Cu, мас. %	1,55	0,89	1,71	2,85	1,15	3,97
Zn	0,34	3,07	0,24	3,32	3,33	13,0
S	43,00	40,00	43,53	43,42	5,40	8,70
Pb	0,094	0,14	0,024	0,058	0,24	1,13
As	0,26	0,25	0,07	0,13	—	—
Sb, г/т	240	210	76,5	242,6	—	—
Bi	50	25	—	—	—	—
Te	24,55	17,70	10,32	8,30	—	—
Hg	12,0	40,0	—	—	—	—
Au	1,01	1,52	1,0	2,5	2,8	7,15
Ag	40,98	70,10	5,01	15,40	39,5	116,0

Примечание. МР – медная руда; МЦР – медно-цинковая руда.

ных и мелких объектов [Викентьев и др., 2007]. Наряду с галенитами названных месторождений исследовались галениты руд крупного Сафьяновского месторождения, которое расположено в пределах Восточной вулканогенной зоны Среднего Урала [Коротеев и др., 1997].

Результаты этих исследований показали, что изотопный свинцовый возраст большей части месторождений в той или иной степени более древний, чем геологический. Согласно общепринятой модели «плюмботектоники», рудный свинец формировался из различных источников. Данная модель основана на идеях тектоники литосферных плит и предусматривает возможность обмена ураном, торием и свинцом между земной корой и мантией в течение всего геологического времени. В качестве основных источников рассматриваются: верхняя и нижняя земная кора, мантия и ороген. Исследования изотопного состава рудного свинца современных подводных гидротермальных построек, в первую очередь бассейна Манус, показали, что наряду с мантийным источником свинец мог поступать из кислых пород, погребенных под базальтовыми покровами или из вовлеченных в субдукцию пелагических осадков [Бортников, Викентьев, 2005].

Совпадение геологического и свинцового возрастов отмечается только в отдельных случаях. Речь идет о галените из Северо-Кабанского участка (северное продолжение Кабанских месторождений, Красноуральский рудный район), для которого значение свинцово-изотопного возраста близко геологическому возра-

сту вмещающих толщ – 420-430 млн. лет. Остальные образцы имеют изотопный возраст в диапазоне 460-485 млн. лет (ордовик), т.е. несколько более древний, что может указывать на незначительное поступление в рудообразующие системы свинца, заимствованного из более древних образований. Это было возможно при движении магмы через гетерогенные фрагменты рифейского фундамента Уральской складчатой области, существование которых предполагается под южной частью Тагильского прогиба (в частности, по наличию в андезитах венлока ксеногенных цирконов, датируемых рифеем), при резком преобладании в составе фундамента базитов [Краснобаев и др., 2007]. Повышение основности коры отражается в пониженных отношениях $\mu_2 = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ изученных образцов галенита, варьирующих в пределах 9,27-9,54, т.е. близких мантийным величинам.

Месторождения девонских вулканогенных толщ, развитые в основном на Южном Урале, обладают более заметными вариациями в изотопном составе свинца (рис. 1). Наименее радиогенным является галенит небольших месторождений Октябрьское (Бурибайский район, Ю. Урал) и Бакр-Тау (Баймакский район, Ю. Урал), при этом минимальные отношения ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} = 17,4624$ и ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} = 37,2746$ установлены для Бакр-Тау, а ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} = 15,4952$ – для Октябрьского. Максимальные значения свинцово-изотопного возраста для Октябрьского месторождения и месторождений Баймакского района составляют 610 и 692 млн. лет. При минимальных для девонских месторождений значе-

ниях $\mu_2 = 9,489,55$ из этого следует вовлечение более древнего базитового материала низов земной коры в процессы зарождения и эволюции магм, родоначальных для рудоносных вулканических комплексов [Викентьев и др., 2007].

Наиболее радиогенным является, судя по всем трем изотопным отношениям, свинец руд полиметаллических месторождений Теренсайского района (Джусинское, Барсучий Лог) и Cu-Zn Сибайского месторождения, на которых вмещающие толщи сложены наиболее дифференцированными вулканитами базальт-андезит-дацит-риолитовой серии и вулканогенно-осадочными породами. Максимальные значения всех изотопных отношений установлены на Джусинском месторождении. Причины высоких значений изотопных отношений свинца для Сибая могут быть связаны с повышенной мощностью осадочно-вулканогенных толщ палеозоя и с пониженной мощностью гранулитобазитового слоя, а для месторождений Теренсайского района – с их приуроченностью к восточному борту Магнитогорского прогиба.

Колчеданно-полиметаллические месторождения Теренсайского района пространственно и генетически связаны с вулканизмом, развивавшимся на существенно гранитизированном основании [Медноколчеданные..., 1985]. Руды указанных месторождений отличаются также увеличением содержаний благородных металлов.

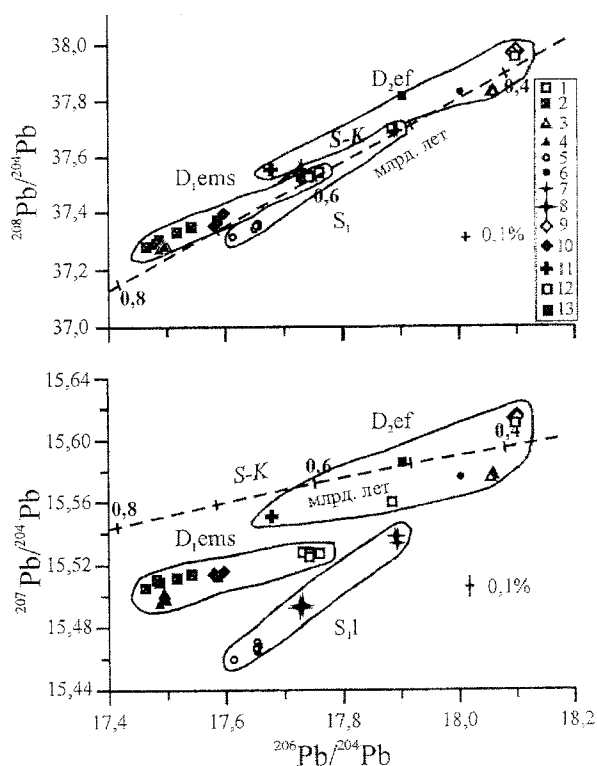
Из колчеданных месторождений, связанных с девонскими вулканическими комплексами, свинцово-изотопный возраст, соответствующий геологическому возрасту, установлен лишь для Сафьяновского месторождения (380 млн. лет), руды которого наименее метаморфизованы. Для суперкрупного Гайского месторождения со свинцово-изотопным возрастом 510–530 млн. лет и пониженным $\mu_2 = 9,52-9,54$ предполагается вовлечение древнего свинца базитов низов земной коры в процессе длительной эволюции гигантской рудно-магматической системы.

Анализ всей совокупности месторождений обнаруживает некоторые общие закономерности. Так, с ходом геологической эволюции от S_1 до D_2e-gv в галенитах нарастает значение μ_2 – от 9,27–9,54 до 9,64–9,83, что может объясняться ростом зрелости коры, более глубокой дифференциацией магмы и увеличением роли кислых выплавок. Важной общей чертой является то, что гомогенным изотопным составом свинца характеризуются сильно метаморфизованные месторождения, в том числе все крупные [Викентьев и др., 2007].

Рассматриваемые месторождения в той или иной степени испытали влияние последующих деформаций, связанных с формированием региональных тектонических структур, которое в свою очередь обусловлено процессами, локализованными в глубинных зонах коры и верхней мантии. Эксперименты и данные по составу пород литосферных плит, испытавших метаморфическое воздействие, соответствующее верхней мантии, показывают, что свинец, золото, сера и галогены могут поступать во флюидную фазу и за счет вещества этих пород. Экспериментальные исследования распределения металлов между эквивалентами мантийных пород и надкритическими водными флюидами, проводившиеся при температурах от 900 до 1200°C и давлениях от 20 до 110 килобар, по-

Рис. 1. Pb-Pb диаграмма для галенита из месторождений Южного и Среднего Урала (по [Викентьев и др., 2007]).

1 – Гайское; 2 – Бакр-Тау; 3 – Сафьяновское; 4 – Октябрьское; 5 – Сан-Донато (им. III Интернационала); 6 – Сибайское; 7, 8 – Кабанское; 9 – Джусинское; 10 – Северный Уваряж; 11 – Учалинское; 12 – Барсучий Лог; 13 – им. XIX партсъезда.



казали, что свинец накапливается во флюидной фазе [Brennan et al., 1995; Aizawa et al., 1999; Kessel et al., 2005]. Содержание свинца в водном флюиде на один-два порядка выше, чем в исходном базальте, причем с увеличением давления и температуры оно увеличивалось. Результаты экспериментов подтверждают данные изотопных исследований о возможности дополнительного поступления свинца в рудолокализирующие структуры после завершения концентрации основной массы рудного вещества. Источник поступления свинца был смешанным: мантийным и за счет метаморфических преобразований пород литосферы, при давлениях и температуре, отвечающим верхней мантии.

Исследования распределения золота с помощью LA ICP-MS анализа в расплавных силикатных и сульфидных включениях из минералов экструзивных и приповерхностных пород андезитового комплекса Фараллон Негро (СЗ Аргентина) показали приуроченность золота к меди. К сожалению, количественных характеристик связи золота с медью, а также свинцом и цинком, не получено, что, по-видимому, связано с незначительным его содержанием и размерами исследуемых включений [Halter et al., 2004]. Изучение состава сульфидных расплавных включений и силикатных расплавов из базальтов срединно-океанических хребтов показало, что медь и золото концентрируются в сульфидах [Peach et al., 1990]. Детальные исследования содержания серы и меди в расплавных силикатных включениях высокомагнезиальных базальтов вулкана Галунгонг острова Ява, Индонезия, показали прямую зависимость содержания меди от серы в субостроводужной мантии [De Hoog et al., 2001].

Одним из важнейших компонентов флюидов золотосодержащих магматических ассоциаций является мышьяк. Связь золота с мышьяком исследовалась для системы: риолитовый расплав–2 % раствор хлорида натрия при 800°C, постоянство летучести кислорода поддерживалось буфером NNO. Опыты проводились в присутствии серы и без нее. Анализы закаленных стекол риолитового состава и содержащихся в них флюидсодержащих включений, выполненные методом LA ICP-MS, показали, что включения содержащие мышьяк и серу, отличаются более низкими содержаниями золота, чем включения, полученные в аналогичных условиях при отсутствии серы [Simon et al., 2007]. Данные опыты подтверждают важ-

ную роль мышьяка как одного из важнейших переносчиков золота.

Особенности связи золота с сульфидами более полно раскрываются на основе привлечения экспериментальных исследований систем, где наряду с серой рассматривается вода, хлор и другие летучие компоненты. Экспериментальным путем распределение золота в надкритических флюидах изучалось в относительно более «мягких», чем для свинца, условиях при давлении до 1,6 килобар и температуре не выше 800°C. В одной из первых сводок данных экспериментов по растворимости золота в сверхкритических рассолах показано, что золото переносится в виде гидросульфидных комплексов. В качестве буфера кислотности рассматривается ассоциация ортоклаз-мусковит-кварц, а для летучести кислорода буфером служит ассоциация пирит-пирротин-магнетит [Luck, Mavrogenes, 1999]. Последующие исследования показали возможность переноса золота в газовой фазе, представленной сероводородом H_2S , посредством образования летучих соединений состава $AuS \cdot (H_2S)_n$ [Zevin et al., 2007].

Наряду с этим, продолжают исследования условий переноса золота в виде хлоридных комплексов. В качестве исходного материала рассматривалась система $NaCl-H_2O$ с переменным количеством $NaCl$ от 2 до 62 его эквивалентного количества в вес. %. В этих условиях отмечалось расслоение системы на пар и насыщенный солевой раствор (рассол). С увеличением давления концентрация золота в паре и растворе возрастала. При дальнейшем его возрастании до 1,6 килобар система гомогенизировалась в состоянии надкритического флюида [Simon et al., 2005].

Особый интерес представляет находка ксенолита силикатного и медь-гидрохлоридного расплава, силикатная часть которого представлена магнезиогастингситом. Он был обнаружен в пределах бассейна моря Бисмарк, вблизи о. Лихир, на рудопроявлении подводной горы TUBAF [Renno et al., 2004]. В авторском изложении, интрузия основной магмы и образование магматической камеры происходило при 1200°C. В интервале от 960 до ~ 800°C происходила кристаллизация кальциевого амфибола из интракумулусного расплава с обогащением его Cu , Fe , S и Cl . По мере понижения температуры, из интракумулусного расплава кристаллизовался гидроксилпатит. В дальнейшем выделялись несмешивающиеся флюидитовый и

сульфидный Cu-Fe-S расплавы, включая выделение Cu-солевого-гидратного расплава, образование паровой фазы, образование промежуточного сульфидного твердого раствора (Iss) и кристаллизация клиноатакамита $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. При температуре $< 557^\circ\text{C}$ происходила субсолидусная кристаллизация кубанита и халькопирита. При температуре 2°C происходила дезинтеграция кумулатов импульсами толчками трахибазальтовой магмы; вынос ксенолитов кумулатов на морское дно; остывание (замерзание) расплавных фаз и микроструктур и образование подводной горы TUBAF. Как считают упомянутые авторы, данная находка может служить доказательством существования обогащенных металлами солевых расплавов, формирующихся при кристаллизации силикатных магм.

Относительно источника поступления рудного вещества в современной литературе наиболее распространены представления о поступлении рудных компонентов за счет выщелачивания из базальтов и перекрывающих их осадков срединно-океанических хребтов по механизму рециклинга разогретой океанической воды. Наряду с этим существует точка зрения о «прямом» поступлении рудоносных магматических флюидов в подводные гидротермальные системы. Применительно к черным курильщикам, она была высказана на основе исследований гидротермального поля PACMANUS, море Бисмарка, Папуа-Новая Гвинея [Yang, Scott, 1996]. Сульфидные постройки данного гидротермального поля отвечают колчеданно-полиметаллическим рудам и отличаются высокими содержаниями золота. Важным моментом является связь рассматриваемого поля с вулканическими постройками андезит-дацитового состава, что отличает его от большей части подводных сульфидных построек, локализованных в породах базальтового состава. В этом отношении поле PACMANUS приближается к уральским месторождениям, основная часть которых связана с вулканитами кислого и среднего состава.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что обогащенные золотом колчеданные руды отличаются повышенными содержаниями свинца и мышьяка. Литературные данные по изотопному составу свинца галенитов показывает возрастание доли радиогенного свинца в галенитах с ходом геологической эволюции от S_1 до $D_2\text{-e-gv}$, что может объясняться ростом зрелости коры, более глубокой диф-

ференциацией магмы и увеличением роли кислых выплавов. Гомогенным изотопным составом свинца отличаются сильно метаморфизованные месторождения, в том числе все крупные. Результаты опубликованных экспериментальных исследований указывают на возможность поступления части свинца, золота и других рудных компонентов с водными флюидами, содержащими серу, мышьяк и хлор, которые освобождались в обусловленном субдукцией процессе высокобарической дегидратации пород блоков континентальных окраин.

Золоторудные месторождения карлинского типа и черносланцевые месторождения явились одним из первых объектов, где были обнаружены природные наночастицы благородных металлов. Интерес к наночастицам, или наноразмерному состоянию твердых веществ и связанным с ним фундаментальным исследованиям, включая разработки нанотехнологий, вышел на государственный уровень. Очевидно, что использование методов этих исследований в приложении к рассматриваемым месторождениям открывает новые перспективы в понимании геохимии и минералогии благородных металлов, как одной из важнейших составляющих современных технологий их извлечения.

Систематические исследования минеральных наночастиц на Урале выполнялись впервые. Методами термомагнитного анализа, рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии, включая режим микродифракции, в вулканитах по всему разрезу пород СГ-4 и в их аналогах с поверхности и околоскважинном пространстве. Основное количество находок, проявлений наночастиц приходится на вскрытую данной скважиной флиш-оидную толщу терригенных пород, обогащенных углистым веществом. В названной толще обнаружен обширный набор минералов (самородное железо, Fe и Fe-Ni интерметаллиды, изоферроплатина (Pt_3Fe), магнетит (Fe_3O_4), и гематит (Fe_2O_3), карбид железа (Fe_3C), сульфиды Fe, Ni, Co и др.), представляющих собой нанокристаллические гетерофазные системы отличающиеся многообразием форм кристаллов и их агрегатов [Шерендо и др., 2003, 2005]. Особого внимания заслуживает находка наночастиц изоферроплатины Pt_3Fe в образце кремнистого алевrolита, обогащенного углистым веществом, поднятом из глубины 5030 м. Размер исследованной однофазовой наночастицы составляет 240×400 нм, который на порядок меньше

ранее обнаруженной в этих же породах частицы платины ($d \sim 5 \text{ мкм} = 5\,000 \text{ нм}$) [Новгородова и др., 1999]. Кроме чисто минералогического интереса, данное открытие имеет непосредственное отношение к форме нахождения платины в рудах черносланцевых и возможно колчеданных месторождений. В вулканитах разреза СГ-4 и ее околоскважинного пространства ультрадисперсные частицы самородных металлов представлены одиночными, рассеянными в породе субмикро- и наносферулами диаметром $\sim 80 \text{ нм}$ ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), изредка образующими прерывистые цепочки, которые как бы трассируют пути просачивания высокотемпературного восстановленного флюида через пористую среду.

Во вскрытой СГ-4 флишеидной толще и в целом по всему разрезу этой скважины наряду с наночастицами представляет интерес акцессорная сульфидная минерализация, которая исследовалась в основном стандартными методами минералогических исследований [Викентьев и др., 1999; Докучаев и др., 1999; Новгородова и др., 1999]. Их результаты показали её многоплановый в генетическом отношении облик, представленный тремя составляющими: колчеданной, медно-никелевой и золоторудной (черносланцевой) минерализацией. Для понимания форм нахождения золота в рудах колчеданных месторождений несомненное значение имеет открытие проявлений микросферул, наночастиц самородного золота и сульфидов на золоторудных месторождениях [Новгородова и др., 2003; Филимонова и др., 2003]. Диапазоны изменения физико-химических условий образования упомянутых золоторудных месторождений во многом перекрываются с таковыми для руд колчеданных месторождений.

Формирование наночастиц минералов в природных условиях рассматривается с привлечением математических моделей процессов кавитации в надкритических водных растворах, которая переносится на гидротермальные растворы, содержащие растворимые соединения металлов [Адушкин и др., 2007]. Данные представления разделяются рядом ведущих исследователей золоторудных месторождений [Новгородова и др., 2003, 2004]. Наряду с этим, наночастицы могут формироваться как в процессах кристаллизации (конденсации) вещества, так и в результате твердофазных превращений в массивном твердом теле («минерале-хозяине») [Хисина, Урусов, 2003].

Заключение

Черносланцевое оруденение Сурьинско-Промысловской зоны отличается промышленно значимыми содержаниями золота, а также платины и палладия, которые подтвердились повторными исследованиями ГЕОХИ РАН.

Золото установлено в форме самородного золота, а также присутствует в виде примеси в сульфидах и сульфоарсенидах. Палладий и платина находятся в виде примесей в сульфидах и сульфоарсенидах. Собственные их минералы пока не установлены. Находки кластеров, наночастиц интерметаллида платины Pt_3Fe в углеродсодержащей флишеидной толще Тагильского прогиба, близкой по литологическому составу рудовмещающим породам Сурьинско-Промысловской зоны, говорит о возможности присутствия минералов платины в черносланцевых рудопрооявлениях.

Колчеданные месторождения Урала от черносланцевых месторождений отличаются преобладанием концентрации золота над платиноидами. На этих месторождениях золото наблюдается в виде собственных минералов, самородного золота и теллуридов, а также примесей в рудообразующих сульфидах. Собственные минералы платиноидов в рудах разрабатываемых месторождений не обнаружены.

В рудах колчеданных месторождений существует геохимическая и минералогическая связь золота со свинцом и мышьяком. Анализ опубликованных экспериментальных исследований указывает на возможность поступления части свинца, золота и других рудных компонентов с водными флюидами, содержащими серу, мышьяк и хлор, которые освобождались в процессе высокобарической дегидратации пород при субдукции блоков коры континентальных окраин.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 07-05-00808; 01-05-64510).

Список литературы

- Адушкин В.В., Андреев С.Н., Попель С.И. Кавитационное выделение нано- и микромасштабных мономинеральных фракций из полиминеральных микрочастиц // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 3. С. 227-234.
- Акинфиев Н.Н., Зотов А.В. Термодинамическое описание хлоридных, гидросульфидных и гид-

роксокомплексов Ag(I), Cu(I) и Au(I) в диапазоне температур 25-500°C и давлений 1-2000 бар // Геохимия. 2001. № 10. С. 1083-1099.

Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Викентьев И.В. и др. Минералого-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд и флюида поля Рейнбоу, ассоциированного с серпентинитами, Срединно-Атлантический хребет (36° 14') // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 6. С. 510-542.

Бортников Н.С., Викентьев И.В. Современное сульфидное полиметаллическое минералообразование в Мировом Океане // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 1. С. 16-50.

Бортников Н.С., Кабри Л., Викентьев И.В. и др. Невидимое золото в сульфидах субмаринных колчеданных построек // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 3. С. 228-240.

Бурак В.А. Проблема генезиса черносланцевых толщ и развитого в них золотого, золотоплатиноидного и прочих видов оруденения // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 1. С. 118-129.

Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я. и др. О концентрации благородных металлов углеводистым веществом пород // Геохимия. 1994. № 6. С. 814-823.

Викентьев И.В., Беленькая Ю.А., Агеев Б.И. Александринское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. № 3. С. 248-274.

Викентьев И.В., Молошаг В.П., Юдовская М.А. Формы нахождения и условия концентрирования благородных металлов в колчеданных рудах Урала // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 2. С. 91-125.

Викентьев И.В., Русинов В.Л., Лапутина И.П., Носик Л.П. Метаморфизм в разрезе Уральской сверхглубокой скважины: минеральные парагенезисы и эволюция флюидного режима //

Научное бурение в России. Вып. 5. Ярославль: ФГУП НПО «Недра», 1999. С. 185-236.

Викентьев И.В., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Молошаг В.П. Результаты свинцово-изотопной систематики колчеданных месторождений Урала по данным прецизионного изотопного анализа методом MC-ICP-MS // Эндогенное оруденение в подвижных поясах. Мат-лы междунар. науч. конф. (XIII Чтения памяти А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 287-290.

Гурская Л.И. Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 208 с.

Дистлер В.В., Лапутина И.П. Сульфидоарсениды никеля и кобальта, содержащие платиновые металлы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 3. С. 718-721.

Добровольская М.Г., Дистлер В.В. Платиновые металлы в рудах медно-колчеданных месторождений Южного Урала // Руды и металлы. 1998. № 4. С. 56-64.

Докучаев А.Я., Тарханов Г.В., Носова А.А. и др. Метаморфогенно-гидротермальное золотое оруденение в именной свите Тагильского прогиба (по материалам Уральской сверхглубокой скважины) // Научное бурение в России. Вып. 5. Ярославль: ФГУП НПО «Недра», 1999. С. 394-409.

Золотов К.К., Новиков И.Н., Седых Э.М. Золото-платиноидное оруденение Сурьинско-Промысловской зоны (Средний и Северный Урал) // Платина России. Новые нетрадиционные типы платиносодержащих месторождений. Результаты и направления работ по программе «Платина России» М.: Геоинформмарк, 2005. С. 69-77.

Золотов К.К., Додин Д.А., Коротеев В.А. и др. Тектоника и металлогения Урала на примере проектируемого транспортного коридора «Урал Промышленный – Урал Полярный» // Литосфера. 2007. № 1. С. 3-31.

Коротеев В.А., Язева Р.Г., Бочкарев В.В. и др. Геологическая позиция и состав Сафьяновского меднорудного месторождения на Среднем Урале. Путеводитель геологических экскурсий. Екатеринбург: ИГЕМ РАН, ИГГ УрО РАН, 1997. 94 с.

Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. Полихронность цирконов габброидов Платиноносного пояса Урала и проблема докембрия Тагильского мегасинклинария // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 6. С. 785-790.

Лисицын А.П., Лапухов А.С., Симонов В.А. и др. Благородные металлы в рудообразующих гидротермальных системах современных океанов // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 2. С. 254-257.

Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения / В.А. Прокин, В.М. Нечуехин, П.Ф. Сопко и др. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.

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

Миронов А.Г., Жмодик С.М., Колесов Г.М. и др. Элементы платиновой группы в золото-сульфидных и полиметаллических рудах Саяно-Байкальской складчатой области и возможные формы нахождения платины и палладия в сульфидах // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 47-66.

Миронов А.Г., Татаринов А.В., Дамдинов Б.Б. и др. Новый тип платино-рутениевой минерализации в серебро-полиметаллических рудах // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 2. С. 231-235.

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.

Молошаг В.П., Грабежеев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я. Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-золо-

то-порфировых месторождений Урала // Литосфера. 2004. № 2. С. 30-51.

Новгородова М.И. Платина, палладий и золото в медноколчеданных рудах Южного Урала // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226. № 4. С. 942-944.

Новгородова М.И., Андреев С.Н., Самохин А.А., Гамянин Г.Н. Кавитационные эффекты в образовании минеральных микросферул в гидротермальных растворах // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 5. С. 669-671.

Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я. и др. Микросферулы самородного золота, сульфидов и сульфосолей в золотых рудах // Геохимия. 2004. № 2. С. 160-172.

Новгородова М.И., Генералов М.Е., Кринов Д.И. Углеродистое вещество и рудная минерализация в породах вулканокластической и флишоидной толщ в разрезе Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4) // Научное бурение в России. Вып. 5. Ярославль: ФГУП НПО «Недра», 1999. С. 318-330.

Осетров О.А. Геологические условия формирования Верхне-Аршинского месторождения и особенности его зоны окисления. Автореф. канд. дисс. М., 1957.

Сотко П.Ф., Бобохов А.С., Серавкин И.Б. и др. Структурный и магматический контроль колчеданного оруденения Башкирии. М.: Наука, 1975. 228 с.

Тектоническое районирование и минерогения Урала // Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России». Вып. 3. / Отв. ред. К.К. Золоев. М.: ГЕОС, 2006. 180 с.

Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В., Бортников Н.С. Наночастицы рудных минералов в рассеянной полиметаллической минерализации Дукатского рудного района // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 4. С. 521-525.

Франклин Д.М., Лайдон Дж. У., Сангстер Д.Ф. Колчеданные месторождения вулканической ассоциации // Генезис рудных месторождений. Т. 2. М.: Мир, 1984. С. 39-252.

Хисина Н.Р., Урусов В.С. Образование гетерофазных наносистем в процессах твердофазных превращений и реакций при изменении T , P , $P(O_2)$, $P(H_2O)$ // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН». № 1 (21)? 2003. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251h/_dgggms/1-2003/informbul-1/term-11.pdf

Шерендо Т.А., Золоев К.К., Юрченко Л.И. и др. Образование нанокристаллических металлов и их соединений в глубинных породах земной коры // Нанотехнология и физика функциональных нанокристаллических материалов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. Т. 1. С. 87-98.

Шерендо Т.А., Юрченко Л.И., Пушин В.Г. и др. Самородные нанопоры на основе железа – новый класс наноструктурных образований // Физика металлов и металловедение. 2003. Т. 95. № 3. С. 73-77.

Широбокова Т.И. Стратиформное полиметаллическое и баритовое оруденение Урала. Свердловск:

УрО АН СССР, 1992. 140 с.

Aizawa Y., Tatsumi Y., Yamada H. Element transport by dehydration of subducted sediments: Implication for arc and ocean island magmatism // Island Arc. 1999. V. 8. P. 38-46.

Arne D.C., Bierlein F.P., Morgan J.W., Stein H.J. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia // Econ. Geol. 2001. V. 96. № 6. P. 1455-1459.

Ashley P.M., Creagh C.J., Ryan C.G. Invisible gold in ore and mineral concentrates from the Hillgrove gold-antimony deposits, NSW, Australia // Mineral. Depos. 2000. V. 35. № 4. P. 285-301.

Barkov A.Y., Thibault Y., Laajoki K.V.O. et al. Zoning and substitutions in Co-Ni-(Fe)-PGE sulfoselenides from the Mount General'skaya layered intrusion, Arctic Russia // Canadian Mineralogist. 1999. V. 37. P. 127-142.

Bierlein F.P., Stein H.J., Coira B., Reynolds P. Timing of gold and crustal evolution of the Paleozoic south central Andes, NW Argentina – implications for the endowment of orogenic belts // Earth Planet. Sc. Lett. 2006. V. 245. P. 702-721.

Brennan J.M., Shaw H.F., Ryerson F.J. Experimental evidence for the origin of lead enrichment in convergent-margin magmas // Nature. 1995. V. 378. № 6552. P. 54-56.

Cook N.J., Chrysosoulis S.L. Concentrations of «invisible gold» in the common sulfides // Canadian Mineralogist. 1990. V. 28. № 1. P. 1-16.

De Hoog J.C.M., Van Bergen M.J., Mason P.R.D. Sulfur and chalcophile elements in subduction zone: Constraints from a laser ablation ICP-MS study of melt inclusions from Galunggung Volcano, Indonesia // Geochim. Cosmochim. Acta // 2001. V. 65. № 18. P. 3147-3164.

Gammons C.H. Experimental investigations of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: V. Equilibria between platinum metal Pt(II) and Pt(IV) at 25 to 300°C // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60. № 10. P. 1683-1694.

Gannoun A., Tessalina S., Bourdon B et al. Re-Os isotopic constraints on the genesis and evolution of the Dergamish and Ivanovka Cu (Co, Au) massive sulphide deposits, south Urals, Russia // Chem. Geol. 2003. V. 196. No 1 - 4. P. 193 – 207.

Halter W.E., Pettke T., Heinrich C.A. Laser-ablation ICP-MS analysis of silicate and sulphide melt inclusions in an andesitic complex I: analytical approach and data evaluation // Contrib. Mineral. Petrol. 2004. V. 147. P. 385-396.

Hayashi K., Ohmoto H. Solubility of gold in NaCl- and H₂S-bearing aqueous solutions at 250-350°C // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. № 8. P. 2111-2126.

Iizasa K., Fiske R.S., Ishizuka O. et al. Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera // Science. 1999. V. 283. № 5404. P. 975-977.

- Kessel R., Schmidt M.W., Pettke T.* Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical fluids at 120-180 km depth // *Nature*. 2005. V. 437. № 7059. P. 724-27.
- Kucha H., Przybylowicz W.* Noble metals in organic matter and clay-organic matrices, Kupferschifer, Poland // *Econ. Geol.* 1999. V. 94. № 7. P. 1137-1162.
- Loucks R.R., Mavrogenes J.A.* Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions // *Science*. 1999. V. 284. № 5423. P. 2159-2163.
- Loukola-Ruskeeniemi K.* Origin of black-shales and the serpentinite-associated Cu-Zn-Co ores at Outokumpu, Finland // *Econ. Geol.* 1999. V. 94. № 7. P. 1007-1028.
- Moss R., Scott S.D.* Geochemistry and mineralogy of gold-rich hydrothermal precipitates from the eastern Manus Basin, Papua New Guinea // *Canadian Mineralogist*. 2001. V. 39. № 4. P. 957-978.
- Pan Y., Xie Q.* Extreme fractionation of platinum group elements in volcanogenic massive sulfide deposits // *Econ. Geol.* 2001. V. 96. № 3. P. 645-651.
- Peach C.L., Mathez E.A., Keays R.R.* Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. № 12. P. 3379-3389.
- Renno T.D., Franz L., Witzke T., Herzig P.M.* The coexistence of melts of hydrous copper chloride, sulfide and silicate compositions in a magnesiohastingsite cumulate, TUBAF Seamount, Papua New Guinea // *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42. № 1. P. 1-16.
- Simon A.C., Frank M.R., Pettke T. et al.* Gold partitioning in melt-vapor-brine systems // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. V. 69. № 13. P. 3321-3335.
- Simon A.C., Pettke T., Candela P.A. et al.* The partitioning behavior of As and Au in S-free and S-bearing magmatic assemblages // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. V. 71. P. 1764-1782.
- Vikentyev I.V., Yudovskaya M.A., Mokhov A.V. et al.* Gold and PGE in massive sulfide ore of the Uzelginsk deposit, Southern Urals, Russia // *Canadian Mineralogist*. 2004. V. 42. P. 651-665.
- Yang K., Scott S.D.* Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system // *Nature*. 1996. V. 383. № 6599. P. 420-423.
- Zezin D.Y., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E.* The solubility of gold in hydrogen sulfide gas: An experimental study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2007. V. 62. P. 3070-3081.

Рецензент доктор геол.-мин. наук В.В. Масленников