

УДК 553.435 (470.5)

ПЛАТИНОИДЫ В РУДАХ КОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА

© 2002 г. И. В. Викентьев, В. П. Молошаг, М. А. Юдовская,
член-корреспондент РАН Н. И. Еремин

Поступило 15.02. 2002 г.

Основным источником добычи элементов платиновой группы (ЭПГ), или платиноидов, являются позднематические месторождения в расслоенных базит-ультрабазитовых массивах. Из гидротермальных образований за рубежом некоторое значение имеют медно-порфиновые месторождения, а в СНГ – золоторудные месторождения. Платиноносность колчеданных месторождений и особенно минералы-концентраты ЭПГ в рудах мало изучены, хотя при рафинировании черновой меди и при переделе полиметаллических концентратов на металлургических комбинатах Урала и Рудного Алтая ЭПГ издавна извлекались. Опубликованы лишь результаты анализа небольших серий проб руд и сульфидных концентратов по отдельным месторождениям Урала, Кавказа и Рудного Алтая [1, 2 и др.]. Валовые содержания ЭПГ в колчеданных рудах и продуктах обогащения достаточно низкие, их суммарное количество обычно находится ниже или на уровне 1 г/т. В связи с тем что сульфидные концентраты обогащены ЭПГ в большей степени, чем руды, логично полагать, что платиноиды подобно золоту и серебру находятся в рудообразующих сульфидах в виде изоморфных примесей и/или минеральных включений. Находка диантимонида палладия $PdSb_2$ в метаморфизованном колчеданном рудопроявлении формации Нэйри, Южная Австралия [3], свидетельствует о перспективе обнаружения минералов ЭПГ и на рассматриваемых месторождениях Урала.

Новые данные о содержаниях платины и палладия в рудах Сафьяновского месторождения (Средний Урал) получены авторами с помощью методики инверсионно-вольтамперметрического анализа [4]. Чувствительность анализов со-

ставляет 0.0001–0.001 г/т, при воспроизводимости анализов 80–90% из навесок 1–10 г. По результатам определений намечается три группы проб с различными содержаниями платины (рис. 1): с низкими (0.02–0.25 г/т), повышенными (0.4–0.9 г/т) и высокими (1.8–2.0 г/т). Последние характерны, с одной стороны, для медных вкрапленных руд, а с другой – для сплошных медно-цинковоколчеданных руд. Содержания платины мало зависят от соотношения в руде пирита, сфалерита и халькопирита; пробы с повышенными содержаниями платины приурочены к зоне Сафьяновского разлома. Повышенные содержания палладия (0.1–0.25 г/т при рядовых 0.01–0.07 г/т) более свойственны медным рудам.

Пробы по другим уральским месторождениям (Учалы, Узельга, Александринское, Дегтярское) проанализированы в ИГЕМ РАН с предварительным химическим концентрированием методом индукционносвязанной плазмы (ICP MS) – на масс-спектрометре PQ-2 Turbo – и хроматографическим (кинетическим) методом. Пределы обнаружения метода ICP MS, г/т: Pt 0.005, Pd 0.005,

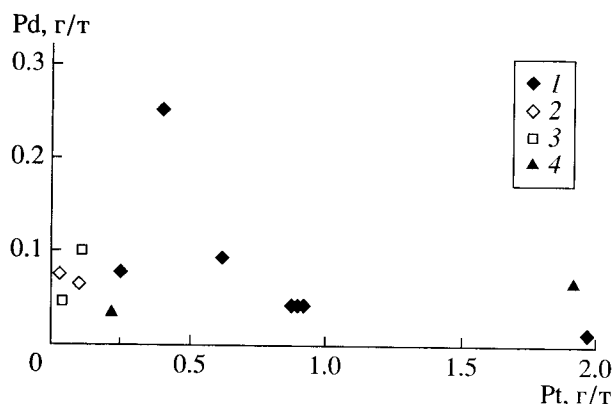


Рис. 1. Результаты определения платины и палладия в медных рудах Сафьяновского месторождения. Типы руд: 1 – медные вкрапленные; 2 – медные вкрапленные богатые; 3 – медноколчеданные богатые; 4 – медно-цинковый колчедан. Лаборатория Объединения “Золото–платина” Томского политехнического университета (химико-аналитики: Л.А. Аркатова, З.С. Михайлова, Е.А. Смышляева).

Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва

Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук,
Екатеринбург

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Таблица 1. Содержания платины и палладия в сульфидах эндогенных месторождений

Минерал	Pt, г/т	Pd, г/т	Источник
Колчеданные месторождения			
Пирит*	0.3	0.5	} [2]
Халькопирит*	0.01–0.5	0.02–0.17	
Алтаит*	10.0	30.0	
Гессит*	50.0	60.0	
Магматические и постмагматические месторождения			
Пирит	0.01–244	0.5–9*	[2, 9]
Халькопирит	0.01–45	0.01–96	[2, 10, 11]
Борнит	10*	19**, 33**	[2, 10]
Золото	600**	10–1000**	[2]

Примечание. Одной звездочкой отмечены единичные анализы, двумя – максимальные содержания. [2] – данные химического (пробирного) анализа мономинеральных фракций; [9, 10] – точечные данные протонного микроанализа (PIXE) и вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS); [11] – точечные анализы SIMS.

Rh 0.0005, Ru 0.0002, Ir 0.0005, а кинетического, г/т: Pt 0.02, Pd 0.01, Rh 0.001, Ir 0.002. ЭПГ в рудах и концентратах распределены неравномерно, характеризуются содержанием от 0.005 до 1.96 г/т их суммы (обычно 0.01–0.05 г/т) с преобладанием платины над остальными ЭПГ. Наибольшим концентрациям Pt (до 1.2–1.96 г/т) сопутствуют повышенные содержания Pd (до 0.1 г/т) и Ir (до 0.02 г/т). Максимальные концентрации палладия достигают 0.2–0.32 г/т. В общем в рудах колчеданных месторождений Урала наибольшим разбросом значений характеризуются концентрации платины: 0.001–1.97 г/т. Содержания палладия близки указанным или ниже: 0.001–0.34 г/т. Обычные их содержания, как и других ЭПГ, оказались на уровне 0.01–0.02 г/т.

В центре внимания авторов были золотосодержащие минеральные ассоциации, условия формирования которых представляются наиболее благоприятными для накопления повышенных концентраций платины и палладия. Нами учтены работы по физико-химическим параметрам переноса и отложения этих металлов в гидротермальных растворах и анализу условий образования парагенетических минеральных ассоциаций. Условия накопления максимальных концентраций гидросульфидных и аммониевых комплексов золота, платины и палладия в гидротермальных растворах практически идентичны [5, 6]. Поля устойчивости теллуридов платины и палладия на диаграммах $\log f_{O_2}$ –pH перекрываются с таковыми для теллуридов золота и серебра [5, 7]. Возможность существования рассеянных форм платиноидов в теллуридах подтверждается находкой

мелонита NiTe₂ с 0.4–1.8 мас. % Pd в колчеданных рудах медно-кобальтового Пышминско-Ключевского месторождения на Среднем Урале [8].

Значимые содержания ЭПГ пробирным анализом установлены также в мономинеральных пробах теллуридов из полиметаллических руд Риддерского месторождения на Рудном Алтае, г/т: алтаит – 10.0 Pt, 30.0 Pd, 2.0 Rh; гессит – 50.0 Pt, 60.0 Pd, 12.0 Rh [2]. Кроме этих минералов, относительно высокие уровни содержаний Pt и Pd зафиксированы различными методами в пирите, халькопирите, борните и самородном золоте ранне- и позднемагматических, а также ортомагматических гидротермальных месторождений (табл. 1).

С полями устойчивости минералов золотосодержащих руд колчеданных месторождений в значительной степени также перекрываются и найденные пределы устойчивости арсенидов платины [5]. Рассеянные формы нахождения платиноидов известны для арсенидов и других минералов мышьяка золоторудных месторождений [4]. Среди названных минералов в колчеданных месторождениях присутствует арсенопирит, который посредством твердофазных реакций с другими сульфидами и парами серы может переходить в блеклые руды или леллингит. Первый из названных переходов возможен при повышении давления паров серы, второй – при понижении [12, 13]. В связи с этим авторами наряду с арсенопиритом исследовалась блеклая руда – наиболее распространенный в колчеданных рудах минерал мышьяка; леллингит не изучался ввиду его крайней редкости.

Исходя из этих предпосылок, основное внимание было сосредоточено на исследованиях примесей платины и палладия в теллуридах, блеклой руде и самородном золоте, появление которых в рудных телах сопровождается повышенными содержаниями золота и серебра. Наряду с этим был выполнен рентгеноспектральный микроанализ сосуществующего с самородным золотом сфалерита для определения значений температуры и летучести серы с помощью элекрум-сфалеритового геотермометра [14]. Исследования распределения примесей платиноидов в минералах проводились на образцах золотосодержащих руд крупных месторождений: Гайского, Узельгинского (Ю. Урал), Сафьяновского и Сан-Донато (Ср. Урал).

Основным методом было исследование минеральных парагенезисов золотосодержащих руд в полированных шлифах при максимально доступных на оптических микроскопах увеличениях (600–1500×). Для выявления собственных минералов благородных металлов был также использован прием выделения ультратяжелой фракции из крупных проб (0.5–1 кг), в которых предварительным анализом установлены повышенные со-

держания Au и ЭПГ. Проводилось разделение обесшламленных проб с помощью электромагнитных сеператоров и в тяжелых жидкостях: ультратяжелый концентрат получался после отмывки в воде и бромформе гранулометрических фракций +0.06...–0.1 и –0.06 мм. Предварительное исследование зерен рудных минералов в шлифах и насыпных препаратах проведено на электронном микроскопе с энергодисперсионной приставкой JSM-5300 + LINK ISIS (аналитик А.В. Мохов, ИГЕМ РАН), нижний порог чувствительности 0.01 мас. %, локальность 1 мкм. Анализы химического состава минералов, включая определение содержаний примесей золота, серебра и платиноидов в индивидуальных зернах рудных минералов и состав их собственных минералов, выполнены на микроанализаторе "Camebax SX-50" (аналитик А.И. Цешин) в ИГЕМ РАН. Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток зонда 20 нА, время счета 10 с (предел обнаружения элементов 0.02 мас. %), для Au, Ag, Pt, Pd в ряде случаев составили 50–100 с (0.005 мас. %). В качестве стандартов использовались чистые металлы – Cu, Ni, Co, Au, Ag, Pt, Pd, Bi, Sb, Te, Se, Ge, простые соединения – FeS₂ (Fe, S), ZnS (Zn), HgTe (Hg, Te), InAs (As), PbS (Pb), CdS (Cd).

Значимые содержания примесей золота и платиноидов установлены в целом ряде минералов золотосодержащих руд (табл. 2, 3). Содержат примеси палладия и платины и впервые выявленные для колчеданных руд Урала айкинит CuPbBiS₃ и виттихенит Cu₃BiS₃ (Сафьяновское месторождение).

Одной из важнейших групп минералов, способных концентрировать заметные количества примесей ЭПГ и золота, являются теллуриды с сульфотеллуридами [2]. Они в основном исследовались в рудах двух месторождений. На Сафьяновском месторождении эти минералы наблюдаются в прожилково-вкрапленных медных (существенно халькопиритовых) рудах. Наиболее часто встречаются гессит Ag₂Te, штютцит Ag_{5-x}Te₂, теллуrowисмутит Bi₃Te₂ и сульфотеллурид тетрадимит Bi₂Te₂S. На Узельгинском месторождении теллуриды встречаются в зонах дробления и перекристаллизации богатых медно-цинковых руд нижнего уровня оруденения (тело 3 и северная часть тела 4). Они в основном представлены алтаитом и гесситом, реже колорадоитом, креннеритом, петцитом. В целом для минералов изученных четырех месторождений высокие содержания платины отмечаются в петците Ag₃AuTe (до 1.55 мас. % Pt), гессите Ag₂Te (до 0.66 мас. % Pt, 1.24 мас. % Pd), колорадоите HgTe (до 0.75 мас. % Pd), алтаите PbTe (до 0.30 мас. % Pt, 0.14 мас. % Pd), тетрадимите Bi₂Te₂S (до 0.26 мас. % Pt, 0.12 мас. % Pd), а также в самородном теллуре (до 0.75 мас. % Pd).

Таблица 2. Максимальные содержания ЭПГ в минералах колчеданных месторождений Урала по данным рентгеноспектрального микроанализа, мас. %

Минерал	Месторождение	Число анал.	Pt	Pd
Галенит	Узельгинское	18	0.22	0.14
	Гай	6	0.24	0.13
Блеклая руда	Узельгинское	12	0.26	0.05
	Узельгинское	13	<0.02	0.38
Гессит	Узельгинское	14	0.66	1.24
Петцит	Узельгинское	4	1.55	<0.02
Алтаит	Узельгинское	12	0.30	0.14
Колорадоит	Узельгинское	4	<0.02	0.75
Самородный Te	Узельгинское	2	<0.02	0.75
Арсенопирит	Сафьяновское	2	0.21	0.03
Тетрадимит	Сафьяновское	5	0.26	0.12
Самородное Au	Узельгинское	22	2.23	0.85
	Гай	26	0.18	0.17

Из распространенных рудных минералов платиноиды накапливаются преимущественно в блеклых рудах и в галените: маложелезистый Zn-теннантит содержит до 0.26 мас. % Pt, 0.38 мас. % Pd, а галенит до 0.24 мас. % Pt, 0.14 мас. % Pd. Повышенные концентрации ЭПГ иногда фиксируются в борните (Pt до 0.16 мас. %, Pd до 0.07 мас. %), халькопирите (Pt до 0.16 мас. %, Pd до 0.04 мас. %) и пирите (Pt и Pd до 0.1 мас. %), однако в связи с близостью к минимальным пределам обнаружения рентгеноспектрального микроанализа эти данные следует считать предварительными: равномерность распределения ЭПГ в сульфидах и уровни их концентрации должны быть исследованы с помощью более чувствительного вторично-ионного микроанализа, SIMS [9]. Наличие значимых содержаний платины в сульфидах не противоречит обнаруженной экспериментальным путем возможности ее концентрации в них [15].

Наиболее существенные примеси платиноидов обнаружены в самородном золоте колчеданных руд (палладия до 0.85 мас. % и платины до 2.23 мас. %). Эти величины близки к максимальным значениям, известным для самородного золота эндогенных месторождений. Наряду с экспериментальными данными последнее является одним из доказательств тесных геохимических связей ЭПГ с золотом в гидротермальных процессах колчеданного рудообразования. Выявленные повышенные концентрации Pt и Pd в минералах, вероятно, отражают изоморфное замещение ими Au, Ag, Pb, Bi, характеризующихся большим объемом катионов. Очевидно не случайным представляется преимущественное накопление ЭПГ в самородном золоте, теллуридах и блеклой

Таблица 3. Представительные микрорентгеноспектральные анализы рудных минералов с повышенными содержаниями ЭПГ, мас. %

№ ан.	Минерал	М-ние	№ обр.	As	Ag	Au	S	Cu	Se	Sb	Fe	Zn	Te	Hg	Pb	Pd	Pt	Bi	Сумма
1	Блеклая руда	1	754/1	21.05	0.14	0.00	26.60	42.53	0.03	0.60	0.22	8.04	0.05	0.11	0.00	0.00	0.26	0.00	99.63
2		2	2267	15.07	0.00		27.62	43.00		5.25	1.33	7.38	0.00	0.00		0.38			100.05
3	Алтайт	2	418/78	0.00	0.08	0.12	0.02	0.00	0.14	0.20	0.55	0.01	35.44	0.10	60.43	0.08	0.25	0.00	97.42
4		2	404	0.00	0.07	0.00	0.00	1.68	0.14	0.05	0.06	0.49	37.27	0.29	61.08	0.00	0.30	0.05	101.48
5		2	404	0.00	0.06	0.00	0.00	0.60	0.19	0.00	0.03	0.64	36.72	0.00	60.96	0.13	0.25	0.00	99.58
6	Гессит	2	22661-2		59.77	0.03	0.00	0.00	0.00			0.00	37.42	0.03	0.03	0.03	0.66		99.33
7		3	2149/126		60.89	0.16	0.00	0.15	0.05	0.21	0.05	0.02	37.33	0.00	0.09	0.00	0.14	0.00	99.09
8	Галенит	2	424	0.00	0.00	0.00	12.88	0.22	1.00	0.00	0.25	0.13	0.14	0.59	84.75	0.00	0.22	0.00	100.18
9		1	754/3	0.00	0.11	0.41	13.19	0.69	0.03	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	85.22	0.07	0.24	0.00	100.15
10		1	754/3	0.00	0.06	0.20	12.68	2.63	0.04	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	83.16	0.13	0.00	0.00	99.55
11	Тетрадимит	3	2149/126		0.00	0.00	4.39	0.52	0.81	0.15	0.26	0.02	35.48	0.00	0.00	0.00	0.26	56.67	98.54
12		3	2149/126		0.00	0.00	4.30	0.23	0.90	0.19	0.19	0.00	35.59	0.02	0.00	0.12	0.06	57.76	99.36
13	Витихенит	3	2149/126		1.78	0.00	18.87	32.15	1.02	0.09	0.45	2.13	0.27	0.19	0.70	0.07	0.15	41.99	99.86
14	Айкинит	3	2149/126		0.00	0.05	17.14	11.20	0.44	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	36.79	0.07	0.00	32.58	98.38
15	Арсенопирит	3	2151/212	48.48	0.07	0.00	19.10	1.71	0.33	0.05	29.80	0.07	0.33	0.00		0.00	0.21	0.00	100.15

Примечание. Месторождения: 1 – Гайское, 2 – Узельгинское, 3 – Сафьяновское. 0.00 – содержание элемента <0.02 мас. %. В ан. 6 установлен йод (2.15 мас. %).

руде – минералах с полностью или частично металлическим типом связи, что объясняет широкий изоморфизм в них Te Bi , Te Sb , As Sb , Au Ag , Cu Ag , Pb Bi и др.

Таким образом, для колчеданных руд Урала установлена тенденция предпочтительного накопления Pt и Pd в самородном золоте и теллуридах по сравнению с сульфидами. Наличие примеси платиноидов в самородном золоте, а также особенности состава находящихся в рудах теллуридов и других минералов, одновременно обогащенных ЭПГ и Au , свидетельствуют о возможности соосаждения этих элементов из гидротермальных растворов.

Авторы благодарны сотрудникам исследовательских лабораторий ИГЕМ РАН за анализы минерального вещества и А.Ф. Коробейникову (Томский ПУ) за возможность выполнения анализов ЭПГ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 00–05–65069 и 01–05–64510), ОАО Учалинский ГОК и ОАО Сафьяновская Медь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dobrovolskaya M.G., Distler V.V.* The Noble Metals in Cu-massive Ore Deposits of South Urals. International Platinum. St. Petersburg; Athens: Theophrastus publ. 1998. P. 155–171.
2. *Юшко-Захарова О.Е.* Платиноносность рудных месторождений. М.: Наука, 1975. 248 с.
3. *Graham J.* // Amer. Miner. 1978. V. 63. № 11/12. P. 1166–1174.
4. *Коробейников А.Ф.* Нетрадиционные комплексные золото-платиноидные месторождения складчатых поясов. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. 237 с.
5. *Mountain B.W., Wood S.A.* // Econ. Geol. 1988. V. 83. № 3. P. 493–510.
6. *Wood S.A., Mountain B.W., Pan P.* // Can. Miner. 1992. V. 30. № 4. P. 955–982.
7. *Zhang X., Spry P.G.* // Econ. Geol. 1994. V. 89. № 5. P. 1152–1166.
8. *Еремин Н.И., Сергеева Н.Е., Шишаков В.Б.* // ДАН. 1997. Т. 355. № 6. С. 795–797.
9. *Cabri L.J.* // Miner. mag. 1992. V. 56. P. 289–308.
10. *Oberthur T., Cabri L.J., Weiser T.W. et al.* // Can. Miner. 1997. V. 35. P. 597–609.
11. *Czamanske G.K., Kunilov V.E., Zientek M.L. et al.* // Can. Miner. 1992. V. 30. P. 249–287.
12. *Scott S.D.* // Miner. mag. 1983. V. 47. P. 427–435.
13. *Shikazono N.* // Econ. Geol. 1985. V. 80. № 5. P. 1415–1424.
14. *Saal R.R., Essene E.J., Kelly C.W.* // Can. Miner. 1990. V. 28. № 4. P. 725–738.
15. *Колонин Г.Р., Перегоедова А.В., Синякова Е.Ф., Федорова Ж.Н.* // ДАН. 1993. Т. 332. № 3. С. 364–367.