

УДК 553.48+553.491+553.062:(571.54)

## ПАЛЛАДИЕВО-ПЛАТИНОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЖИЛЬНЫХ Cu–Ni-РУДАХ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО РАССЛОЕННОГО МАССИВА

© 2003 г. Н. С. Рудашевский, Ю. Л. Крецер, Д. А. Орсов, Е. В. Кислов

Представлено академиком Д.В. Рундквистом 29.11.2002 г.

Поступило 14.01.2003 г.

Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый интрузив – крупный расслоенный массив на юге Сибири (Северное Прибайкалье). В начале 60-х годов в нем были открыты богатые Cu–Ni-руды. В этих рудах установлены повышенные содержания элементов платиновой группы (ЭПГ) [1–3 и др.]. Позже в Йоко-Довыренском массиве выявлен также платиноносный горизонт руд малосульфидного типа [3–6]. Минералы платиновой группы (МПГ) в породах Йоко-Довыренского массива – тетраферроплатина, туламинит, рустенбургит, звягинцевит, масленицковит и мончит – определены [5, 6] только в составе руд этого платиноносного горизонта. Кроме того, в шлихах, отмытых из отвалов шурфа, вскрывшего массивные Cu–Ni-руды, был обнаружен сперрит [7]. В настоящей работе изучена платиноносность и дана первая характеристика минералов-концентраторов благородных металлов жильных Cu–Ni-руд Йоко-Довыренского массива.

Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый интрузив расположен в осевой части Олоkitского рифтогенного прогиба и залегает согласно среди карбонатно-терригенных пород довыренской серии позднего рифея. Это крупное силлоподобное тело, вытянутое в северо-восточном направлении на 26 км при максимальной мощности 3.5 км. Массив находится в нарушенном, близком к вертикальному, залегании, благодаря чему на современном эрозионном срезе обнажена, по-видимому, краевая часть плутона, о чем свидетельствует крутое падение ультраосновных пород на северо-запад, а расслоенной серии и габброидных пород на юго-восток. Абсолютный возраст массива определен в интервале  $700 \pm 35$  млн. лет (Sm–Nd-метод) [8] –  $740 \pm 55$  млн. лет (Rb–Sr-изохрона) [9].

Средневзвешенный состав интрузива близок к коматиитовому. Большинство пород массива характеризуется парагенезисом: оливин (Ol) + плагиоклаз (Pl) + клинопироксен (Cpx) ± ортопироксен (Opx) ± хромшпинель. По закономерной смене кумулюсных и интеркумуляусных ассоциаций породообразующих минералов (снизу вверх в обобщенном разрезе массива были выделены следующие зоны: А – краевая плагиоклазсодержащих перидотитов (лерцолиты и верлиты), во вмещающую толщу от них под острым углом отходят силлоподобные апофизы тех же лерцолитов и верлитов; Б – ультрамафитовая зона, сложенная дунитами с горизонтами, содержащими ксенолиты магнезиальных скарнов и карбонатных пород, в нижней ее части присутствует слой плагиодунитов; В – расслоенная плагиодунит-троктолитовая серия, в нижней ее части широко распространены верлиты с жилами и гнездами диопсидитов; Г – умеренно расслоенная серия оливиновых габбро и габбро-норитов с участками ритмичного чередования троктолитов и оливиновых габбро. В прикровлевой и приподошвенной частях интрузива и во вмещающей толще отмечаются многочисленные жилы и жилы гранофировых габбро-норитов.

Характеристика Cu–Ni-сульфидных руд Йоко-Довыренского массива детально рассмотрена в [10, 11 и др.]. Cu–Ni-руды, вкрапленные и густо-вкрапленные, приурочены к плагиолерцолитам краевой зоны (А) массива и к их силлоподобным апофизам. Тела вкрапленных руд прослеживаются по простиранию до 1400–1700 м при ширине выхода их на поверхность 8–25 м. Жильные Cu–Ni-руды, брекчиевидной текстуры и еще более редкие массивные, обычно находятся внутри аралов сульфидной вкрапленности и контролируются протемагматической трещиноватостью. Они развиты преимущественно на северо-восточном фланге массива.

Богатые Cu–Ni-руды сложены преимущественно на 40–95% псевдогексагональным пирротинном (иногда в тонких сростаниях с троилитом), пентландитом и замещающим его виоларитом (7–25%), а также халькопиритом (0.1–6%). Встреча-

*Закрытое акционерное общество  
Региональный аналитический центр  
“Механобр-Аналит”*

*Геологический институт  
Сибирского отделения  
Российской Академии наук, Улан-Удэ*

**Таблица 1.** Общая характеристика зерен, содержащих благородные металлы минералов в изученном “тяжелом” концентрате брекчиевидных Cu–Ni-руд

№ ан.	Минерал	Формула	Число зерен	Размеры зерен, мкм			Объемн. % минерала
				min	max	средний	
1	Сперрилит*	PtAs <sub>2</sub>	51	9	63	37	89.5
2	Геверсит	PtSb <sub>2</sub>	1	–	–	19	0.4
3	Садбериит*	(Pd, Ni)(Sb, Bi)	5	15	56	31	6.9
4	Мертиит II*	Pd <sub>8</sub> Sb <sub>3</sub>	1	–	–	14	0.2
5	Неназванный	Pd <sub>2</sub> Sb	1	–	–	48	2.7
6	Кюстелит (?)	(Ag, Au)	1	–	–	15	0.3
	Сумма		60				100
7	Маухерит*	(Ni, Co, Fe) <sub>8</sub> As <sub>11</sub>	33**	19	76	37	

\* Минералы обнаружены также в полированных шлифах.

\*\* Размеры зерен маухерита определены по выборке 33 случайных зерен в “тяжелом” концентрате.

ются также кубанит, ильменит, магнетит, хромшпинелиды, пирит, реже титаномагнетит, кобальтовый маккинавит, сфалерит, галенит и маухерит [11].

В сульфидном цементе брекчиевидных руд присутствуют фрагменты серпентинитов (с реликтами оливина и клинопироксена) и обломков измененных габбро-норитов, в которых плагиоклаз в различной мере замещен эпидотом, прениитом и хлоритом, а моноклинный пироксен амфиболлизирован и хлоритизирован.

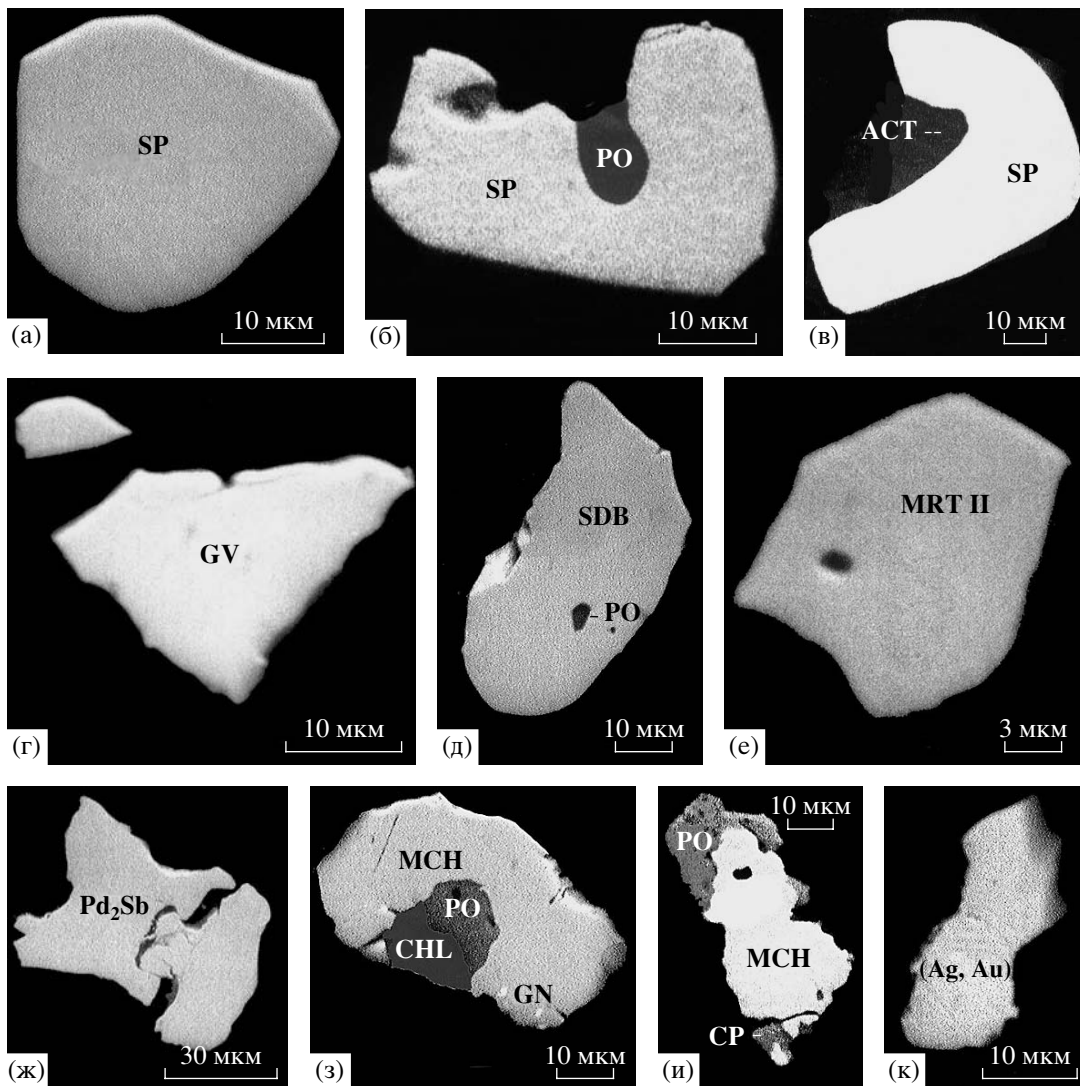
Богатые Cu–Ni-руды относительно бедны ЭПГ, сумма их, как правило, редко превышает 1 г/т. Как и в большинстве Cu–Ni-месторождений мира, связанных с расслоенными интрузивами [12], среди ЭПГ доминирует палладий, доля его закономерно растет по мере насыщения пород сульфидами и максимальна в массивных рудах.

Для выявления минерализации благородных металлов жильных руд Йоко-Довыренского массива нами отобрана проба брекчиевидной руды массой 6 кг из канавы по ручью Школьный (участок “Озерный”). Ее химический состав следующий, мас. %: Ni 2.14; Cu 0.42; Co 0.104; S 19.80; Zn 0.029; Pb 0.011. В составе этой пробы атомно-абсорбционным и кинетическим методами (анализы выполнены в ЦНИГРИ) определены концентрации благородных металлов, г/т: Pt 0.112, Pd 0.725, Rh <0.02, Ru 0.027, Ir 0.018, Os 0.012, Au 0.44.

При изучении минералов-концентратов благородных металлов использована технология гидросепарации “тяжелых” концентратов из пород, руд и технологических продуктов [13]. Дробление исходной руды проводилось на лабораторной вибрационной мельнице “Pulvirizette-9”. Рабочая ступка ее имеет объем 100 мл, она легко идеально очищается. Химический состав материала ступки известен. Процесс дробления кратковременный (15–20 с) малыми порциями, так что в продукте дробления всегда сохраняются крупные

зерна материала исходной пробы, что предохраняет тонкие зерна аксессуариев от переизмельчения. Тонкий класс от каждой порции продукта дробления отделялся ситованием на делителе фирмы “Retsch” (очистка сит в ультразвуковой камере). Применение гидросепаратора оригинальной конструкции HS-01 [14, 15] обеспечивает возможность получения из минералогических проб (использован продукт дробления крупностью <63 мкм исходной руды массой 320 г) тонких концентратов (массой 5–20 мг) “тяжелых” (с более высокой плотностью по отношению к порообразующим или рудообразующим минералам) аксессуариев (обогащение до 10000 раз). Из “тяжелых” концентратов прессованием с пластмассой получены искусственные полированные шлифы, которые затем исследовались методами оптической (микроскоп “Axiorplan”) и электронной микроскопии, а также микронзондового анализа (“Camscan-4DV”, “Link AN-10000”, “Microspec-4DV”). Данные об аксессуарных минералах “тяжелых” концентратов сопоставлялись с результатами изучения полированных шлифов исходных руд.

В искусственных полированных шлифах “тяжелых” концентратов из брекчиевидных жильных Cu–Ni-руд Йоко-Довыренского массива определены 60 зерен минералов благородных металлов (табл. 1, см. рис. 1): обнаружены два Pt-минерала – сперрилит (см. рис. 1а–1в; табл. 2, ан. 1–3) и геверсит (см. рис. 1г; табл. 2, ан. 4); три Pd-минерала – садбериит (см. рис. 1д; табл. 2, ан. 5–9), мертиит II (см. рис. 1е, табл. 2, ан. 10) и неназванный минерал состава Pd<sub>2</sub>Sb (см. рис. 1ж; табл. 2, ан. 11), а также один Au–Ag-минерал – кюстелит(?) (см. рис. 1к; табл. 2, ан. 12). Кроме того, выявлена рассеянная форма Pd – в составе маухерита, характерного минерала богатых Cu–Ni-руд (см. табл. 2, ан. 13). По результатам микронзондового анализа (“Microspec-4DV”, экспозиция 100 с, чувствительность 0.005 %) 6 зерен маухерита в полированном шлифе руды концентрация Pd



**Рис. 1.** Зерна содержащих элементы платиновой группы минералов “тяжелого” концентрата брекчиевидных Cu–Ni-руд (а–к). SP – сперрилит, GV – геверсит, MRT II – мертиит II, MCH – маухерит, PO – пирротин, CP – халькопирит, GN – галенит, ACT – актинолит, CHL – хлорит.

в этом минерале 0.08–0.19 мас. %, в среднем 1250 г/т. В составе других минералов изученных руд, в том числе в пентландите и виоларите, Pd микронзондовым анализом не обнаружен.

Непосредственно в полированных шлифах изученных руд встречены только 5 очень мелких (<5 мкм) зерен минералов платиновой группы – 2 зерна сперрилита, 2 зерна мертиита(?) и одно зерно садбериита(?), локализованных в агрегатах содержащих воду вторичных силикатов (эпидот и хлорит) или на границах этих минералов с сульфидами (пирротин и пентландит).

Размеры изученных 59 зерен МПГ из “тяжелых” концентратов лежат в интервале 9–63 мкм, в среднем 37 мкм. Зерна МПГ чаще мономинеральные (см. рис. 1а, 1г, 1ж), встречены также сростки сперрилита с пирротин, актинолитом (см. рис. 1б, 1в) и с халькопиритом, а садбериита с

пирротин (см. рис. 1д, 1е). Pd-содержащий маухерит, судя по встреченным зернам-сросткам его с другими минералами (с пирротин, халькопиритом, галенитом и хлоритом – см. рис. 1з, 1и), синхронен с МПГ, с рудообразующими сульфидами и с богатыми летучими компонентами силикатами. При этом платина формирует в жильных Cu–Ni-рудах собственные минералы, тогда как у палладия преобладает его рассеянная форма – в виде твердого раствора в маухерите  $Ni_{11}As_8$ .

Этот вывод объясняет видимое противоречие данных о распределении ЭПГ в изученных рудах – преобладание Pd над Pt – и доминирование сперрилита среди выявленных в этих рудах минералов платиновой группы.

В заключение подчеркнем контрастные различия МПГ в разных типах руд Йоко-Довьренского массива. Жильные Cu–Ni-руды характери-

**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) содержащих благородные металлы минералов брекчиевидных Cu–Ni-руд

№ ан.	Pt	Pd	Ni	Co	Fe	As	Sb	Bi	Au	Ag	Сумма
1	56.7	–	–	–	–	42.8	0.9	–	–	–	100.4
2	57.5	–	–	–	–	43.4	–	–	–	–	100.9
3	57.0	–	–	–	–	42.8	–	–	–	–	99.8
4	44.1	–	–	–	–	–	54.4	–	–	–	98.5
5	–	43.1	1.5	–	–	–	49.6	5.2	–	–	99.4
6	–	43.0	1.7	–	–	–	50.0	3.6	–	–	98.3
7	–	43.7	1.4	–	–	–	49.3	4.6	–	–	99.0
8	–	42.8	1.3	–	0.5	–	49.3	5.6	–	–	99.5
9	–	41.2	3.3	–	–	–	51.2	3.4	–	–	99.9
10	–	68.0	–	–	0.8	–	30.8	–	–	–	99.6
11	–	63.9	–	–	–	–	36.5	–	–	–	100.4
12	–	–	–	–	–	–	–	–	50.9	49.0	99.1
13*	–	0.125	49.3	1.7	1.2	46.7	–	–	–	–	99.025

Примечание. Ан. 1 – сперрилит  $Pt_{1.00}(As_{1.97}Sb_{0.03})_{2.00}$ ; ан. 2 – сперрилит  $Pt_{1.01}As_{1.99}$ ; ан. 3 – сперрилит  $Pt_{1.01}As_{1.99}$ ; ан. 4 – гевверсит  $Pt_{1.01}Sb_{1.99}$ ; ан. 5 – садбериит  $(Pd_{0.94}Ni_{0.06})_{1.00}(Sb_{0.94}Bi_{0.06})_{1.00}$ ; ан. 6 – садбериит  $(Pd_{0.94}Ni_{0.07})_{1.01}(Sb_{0.95}Bi_{0.04})_{0.99}$ ; ан. 7 – садбериит  $(Pd_{0.95}Ni_{0.06})_{1.01}(Sb_{0.94}Bi_{0.05})_{0.99}$ ; ан. 8 – садбериит  $(Pd_{0.93}Ni_{0.05}Fe_{0.02})_{1.00}(Sb_{0.94}Bi_{0.06})_{1.00}$ ; ан. 9 – садбериит  $(Pd_{0.88}Ni_{0.13})_{1.01}(Sb_{0.95}Bi_{0.04})_{0.99}$ ; ан. 10 – мертиит I  $(Pd_{7.76}Fe_{0.18})_{7.94}Sb_{3.06}$ ; ан. 11 – без названия  $Pd_{2.00}Sb_{1.00}$ ; ан. 12 – кюстелит (?)  $(Ag_{0.64}Au_{0.36})_{1.00}$ ; ан. 13 – маухерит  $(Ni_{10.53}Co_{0.36}Fe_{0.27}Pd_{0.015})_{11.175}As_{7.82}$ .

\* Средний из 6 анализов в 6 различных зернах.

зуются более ограниченным видовым составом МПГ: они представлены, главным образом, арсенидами (сперрилит) и стибнидами (садбериит, гевверсит, мертиит II, минерал состава  $Pd_2Sb$ ). В малосульфидном оруденении платиноносного горизонта, по нашим новым данным, количественно преобладают теллуриды Pt и Pd – мончеит  $Pt(Te, Bi, Pb)_2$ , котульскит Pd  $(Te, Bi, Pb)$  – и интерметаллиды Pt и Pd – тетраферроплатина  $Pt(Fe, Cu, Ni)$ , потарит  $PdHg$ , а также редкие здесь изоферроплатина  $Pt_{3+x}(Fe, Ni, Cu)$  и туламинит  $Pt_2Fe(Cu, Ni)$ . Арсениды – сперрилит  $PtAs_2$ , атенит  $(Pd, Hg)_3As$  и маякит  $PdNiAs$ ; станниды – атокит  $(Pd, Pt)_3Sn$ , рустенбургит  $(Pt, Pd)_3Sn$ , таймырит  $(Pd, Cu)_3Sn$ , паоловит  $(Pd, Pt)_2Sn$ ; плюмбиды – звягинцевит  $Pd_3(Pb, Hg)$ ; стибниды – мертиит II  $(Pd, Pt)_8(Sb, Te)_3$  и некоторые другие – имеют в этих рудах ограниченное развитие. Рассеянная форма палладия в малосульфидном типе руд – твердый раствор в пентландите (в среднем 360 г/т Pd). Минералы Au и Ag здесь тоже более многочисленны: преобладают самородное золото состава  $Au_3Ag$  и электрум  $AuAg$ , более редкие – кюстелит(?)  $(Ag, Au)$ , тетраурикуприд  $(Au, Pd)Cu$  и некоторые другие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 01–05–97257, 01–05–64252).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Трунева М.Ф., Качаровская Л.Н. // ДАН. 1985. Т. 280. № 1. С. 188–191.
- Кривенко А.П., Лапухов А.С., Глотов А.И. и др. Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. Новосибирск, 1991. С. 110–132.
- Дистлер В.В., Степин А.Г. // ДАН. 1993. Т. 328. № 4. С. 498–501.
- Kislov E.V., Orsoev D.A. // IAGOD Newsletter. 1993. P. 23.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсов Д.А. // Геология руд. месторождений. 1994. Т. 36. № 6. С. 545–553.
- Орсов Д.А., Кислов Е.В., Конников Э.Г. и др. // ДАН. 1995. Т. 340. № 3. С. 225–228.
- Качаровская Л.Н., Трунева М.Ф. Эндеогенные процессы и оруденение в Забайкалье. Улан-Удэ, 1986. С. 120–123.
- Неймарк Л.А., Немчин А.А., Амелин Ю.В. и др. XII Всесоюзн. симп. по стабильным изотопам в геохимии. Тез. докл. М., 1989. С. 323–324.
- Кислов Е. В., Конников Э. Г., Посохов В. Ф. и др. // Геология и геофизика. 1989. № 9. С. 140–144.
- Шишкин Н.Н. // Геол. руд. месторожд. 1964. № 1. С. 93–98.
- Конников Э.Г., Качаровская Л.Н., Загузин Г.Н. и др. // Геология и геофизика. 1990. № 2. С. 59–66.
- Barnes S.-J., Boyd R., Korneliussen A. et al. Geo-Platinum 87. L.: Elsevier, 1988. P. 113–143.
- Rudashevsky N., Kretser Yu., Rudashevsky V. European Union of Geosciences. EUG XI. Strasbourg. 2001. P. 100.
- Рудашевский Н.С., Лунал С.Д., Рудашевский В.Н. Пат. РФ № 216530. М., 2001.
- Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Lupal S.D. Pat. Cooperation Treaty PCT, 2001.