

УДК 552.321.6+553.491(571.54)

БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МАЛОСУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОМ РАССЛОЕННОМ МАССИВЕ (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© 2003 г. Д. А. Орсов, Н. С. Рудашевский, Ю. Л. Крецер, Э. Г. Конников

Представлено академиком А.А. Маракушевым 02.12.2002 г.

Поступило 18.12.2003 г.

Наиболее крупные месторождения металлов платиновой группы относят к малосульфидному типу. Они обычно приурочены к специфическим горизонтам (рифам) крупных расслоенных массивов (Бушвельд, Стиллуотер, Великая Дайка, Федорово-Панский, Пеникат и др.). Породы, слагающие эти горизонты, отличаются наибольшей петрографической и минеральной неоднородностью, а оруденение характеризуется весьма малым содержанием сульфидных минералов, но высокими концентрациями элементов платиновой группы (ЭПГ) и широким развитием минералов с летучими компонентами. Ярким примером такого рода образования является платиноносный горизонт, выявленный недавно в Йоко-Довыренском расслоенном массиве [1–4].

Известно, что минералы платиновых металлов представляют уникальную минеральную группу, изучение которой в комплексе с другими методами дает возможность получить информацию о геохимических условиях пороодо- и рудообразования и реконструкции различных геологических обстановок. В настоящей работе рассмотрены новые данные по минерализации благородных металлов и особенностям ее формирования, полученные нами в последние годы в процессе минералого-геохимического изучения малосульфидного оруденения Йоко-Довыренского дунит-троктолит-габбрового массива.

Йоко-Довыренский интрузив расположен в осевой части Олокинского рифтогенного прогиба и залегает субсогласно среди карбонатно-терригенных пород довыренской серии позднего рифея [3]. Массив представляет собой расслоенное

линзовидное тело, вытянутое в северо-восточном направлении на 26 км при максимальной мощности 3.5 км. Абсолютный возраст массива определен в интервале 700 ± 35 млн. лет (Sm–Nd-метод) [5] – 740 ± 55 млн. лет (Rb–Sr-изохрона) [6].

Большинство пород массива характеризуется парагенезисом оливин (Ol) + плагиоклаз (Pl) + + клинопироксен (Cpx) ± ортопироксен (Opx) ± ± хромшпинель. По закономерной смене кумулюсных и интеркумулясных ассоциаций породообразующих минералов снизу вверх в обобщенном разрезе массива были выделены следующие зоны [3]: А – нижняя приконтактная плагиоклазовых лерцолитов и верлитов; В – ультрамафитовая, сложенная дунитами; С – расслоенная плагиодунит-троктолитовая серия; D – умеренно расслоенная серия оливиновых габбро и габброноритов. В прикровлевой и приподошвенной частях интрузива и во вмещающей толще отмечаются многочисленные силлы и жилы гранофировых габброноритов. В зоне А сосредоточено сульфидное Cu–Ni-оруденение, содержащее до 1.5 г/т Pd и 0.27 г/т Pt.

Малосульфидный тип благороднометальной минерализации отнесен к Рифу I, в котором отмечены наиболее значительные содержания Σ ЭПГ + Au (до 15.4 г/т). Он расположен над расслоенной троктолит-плагиодунитовой серией в основании габброидной зоны (зоны С и D соответственно) и протягивается по всей длине массива. В его строении принимает участие практически весь спектр пород, слагающий массив в целом. Риф I имеет переменную мощность (150–190 м) и характеризуется широким развитием такситовых текстур, а также присутствием многочисленных анортозитовых обособлений с убогой вкрапленностью сульфидов (до 5–7 об.%). В таких анортозитах и сосредоточена благороднометальная минерализация.

С целью изучения минеральных фаз благородных металлов была отобрана проба анортозитов массой 6 кг на участке “Центральный”. Ее хими-

*Геологический институт Сибирского отделения
Российской Академии наук, Улан-Удэ
ЗАО “Региональный аналитический центр
Механобр-Аналит”, Санкт-Петербург
Институт экспериментальной минералогии
Российской Академии наук,
Черноголовка Московской обл.*

Таблица 1. Видовой состав, количество и размеры зерен минералов благородных металлов, выделенных из пробы анортозитов малосульфидного оруденения (Риф I) Йоко-Довыренского массива

№ п/п	Минерал	Формула	Число зерен	Размер зерна, мкм		
				min.	max.	средний
1	Мончеит	(Pt, Pd)(Te, Bi, Pb) ₂	22	8	61	34
2	Потарит	PdHg	17	4	62	29
3	Тетраферроплатина	(Pt, Pd)(Fe, Cu, Ni)	15	4	42	24
4	Котульскит	Pd(Te, Pb, Bi)	4	37	47	41
5	Паоловит	(Pd, Pt) ₂ Sn	2*	6	24	15
6	Сперрилит	PtAs ₂	1*	10	13	11
7	Атоцит	(Pd, Au)(Sn, As, Sb)	1*	7	25	13
8	Маякит	PdNiAs	1*	2	8	6
9	Изоферроплатина	Pt _{3+x} (Fe, Cu, Ni)	1*	9	21	14
10	Звягинцевит	(Pd, Pt) ₃ Pb	1*	10	12	11
11	Мертиит I	(Pd, Pt) ₈ (Sb, Te) ₃	1*	2	4	3
12	Теларгпалит	(Pd, Ag) ₄ (Te, Pb)	1*	1	3	2
13	Соболевскит	Pd(Bi, Te)	2**	1	3	2
14	Неизвестная фаза	(Pd, Hg) ₂ (Cu, Fe)S(Te, Pb)	1*	18	20	19

* Только в сростках с другими минералами благородных металлов.

** Обнаружен только в полированных шлифах из руды.

ческий состав следующий (мас.%): SiO₂ 44.90, TiO₂ 0.20, Al₂O₃ 26.00, Fe₂O₃ 1.52, FeO 3.56, MnO 0.09, MgO 6.17, CaO 13.45, Na₂O 1.60, K₂O 0.19; P₂O₅ 0.06, п.п.п. 2.00, сумма 99.74. S 0.36, Ni 0.060, Cu 0.172, Co 0.005. Химико-спектральным методом определены концентрации благородных металлов (г/т): Pt 1.29, Pd 1.05, Rh 0.015, Ir 0.005, Au 0.955*.

Для выделения минералов-концентраторов благородных металлов использована оригинальная технология гидросепарации “тяжелых” концентратов из пород и руд [7, 8]. Дробление исходной породы проводили до крупности 5 мм, а дальнейшее измельчение – на дисковой вибрационной мельнице “Pulvirizette-9”. Тонкий класс от каждой порции продукта измельчения отделяли ситованием на делителе фирмы “Retsch” (очистка сит – в ультразвуковой камере). Применение гидросепаратора оригинальной конструкции HS-01 [9] обеспечивает возможность получения из минералогических проб тонких концентратов (весом 5–20 мг и крупностью <63 мкм) “тяжелых” аксессуаров. Из “тяжелых” концентратов прессованием с пластмассой были получены искусственные полированные шлифы, которые затем исследовали методами оптической (микроскоп AxioPlan) и электронной микроскопии, а также микронзондового

* Все анализы выполнены в Геологическом институте СО РАН, (г. Улан-Удэ).

анализа (CamsCan-4DV, Link AN-10000, Microspec-4DV).

С помощью вышеописанной методики нами выявлено 68 зерен минералов ЭПГ. В табл. 1 приведены их видовой состав, количество и размеры зерен, а в табл. 2 – выборочные химические составы. Из 14 установленных минеральных видов 10 относятся к соединениям Pd и только 4 – к минералам Pt. Однако на долю последних приходится более половины из всех найденных зерен минералов ЭПГ. Главными минералами являются мончеит, потарит и тетраферроплатина, заметную роль в рудах играет котульскит. Остальные минералы представлены единичными зернами, причем соболевскит выявлен нами только в полированных шлифах из руды. В ассоциации с тетраферроплатиной и котульскитом обнаружена неизвестная фаза состава (Pd,Hg)₂(Cu,Fe)S(Te,Pb).

Наиболее крупные зерна (до 42–62 мкм) образуют мончеит, котульскит, потарит, тетраферроплатина. Для других платиноидов характерны весьма малые размеры (см. табл. 1), что в некоторых случаях затрудняет их диагностику и определение состава. Обычно зерна мономинеральные, однако иногда можно обнаружить сростания тетраферроплатины со звягинцевитом, изоферроплатиной, котульскитом и неизвестной фазой (Pd,Hg)₂(Cu,Fe)S(Te,Pb), сперрилита с атоцитом, маякитом и самородным золотом, паоловита с мончеитом и серебром самородным (рис. 1).

Таблица 2. Химический состав минералов ЭПГ из анортозитов малосульфидного оруденения (Риф I) Йоко-Довыренского массива

Анализ	Элементы, мас. %														Сумма
	Pd	Pt	Au	Cu	Fe	Ni	Hg	Sn	Pb	Sb	Te	Bi	S	As	
1	2.5	74.4	–	6.1	15.7	1.3	–	–	–	–	–	–	–	–	100.0
2	–	80.0	–	4.8	14.2	1.4	–	–	–	–	–	–	–	–	100.4
3	–	88.5	–	1.1	10.8	0.5	–	–	–	–	–	–	–	–	100.9
4	57.5	3.1	–	–	–	–	–	–	38.6	–	–	–	–	–	99.2
5	–	41.0	–	–	–	–	–	–	6.4	–	46.3	6.0	–	–	99.7
6	0.6	40.9	–	–	–	–	–	–	–	–	53.9	3.4	–	–	98.8
7	37.2	5.7	–	–	–	–	–	–	9.5	–	40.2	5.5	–	–	98.1
8	43.5	–	–	–	–	–	–	–	8.8	–	47.2	–	–	–	99.5
9	34.6	–	–	–	–	–	65.7	–	–	–	–	–	–	–	100.3
10	64.8	6.5	–	–	–	–	–	–	–	22.1	5.9	–	–	–	99.3
11	68.9	–	6.2	–	–	–	–	14.0	–	3.8	–	–	–	6.7	99.6
12	43.7	–	–	–	–	25.0	–	–	–	–	–	–	–	30.8	99.5
13	–	56.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	43.3	99.8
14	60.0	5.2	–	–	–	–	–	34.7	–	–	–	–	–	–	99.9
15	41.0	–	–	7.6	5.9	–	4.6	–	11.9	–	22.0	–	6.3	–	99.3

Примечание. 1, 2 – тетраферроплатина, 3 – изоферроплатина, 4 – звягинцевит, 5, 6 – мончеит, 7, 8 – котульскит, 9 – потарит, 10 – мертиит I, 11 – атоцит, 12 – маякит, 13 – сперрилит, 14 – паоловит, 15 – неизвестная фаза (Pd, Hg)₂(Cu, Fe)S(Te, Pb).

Минералы благородных металлов в анортозитах обычно ассоциируют с халькопиритом и кубанитом, реже талнахитом и борнитом. Они локализируются в промежутках зерен сульфидов, содержатся в прожилках самых поздних генераций сульфидов, а наиболее часто располагаются на контакте сульфидов и вторичных силикатов, обогащенных летучими компонентами (цоизит, пренит, хлорит и др.). Развитие тетраферроплатины и изоферроплатины связано с появлением в сульфидном парагенезисе троилита и железистого пентландита.

Для тетраферроплатины, мончеита и котульскита характерна сильная изменчивость состава по главным и примесным элементам. Так, например, в мончеите содержание Pt изменяется в пределах (мас.%) 39.8–41.4, Te – 46.3–53.9, а концентрация примесей Pb и Bi – соответственно 0–7.8 и 0–7.6. В котульските содержание Pd варьирует от 37.2 до 43.5, Te – от 40.2 до 47.2, Pb – от 4.7 до 12.4 мас.% (см. табл. 2). Помимо собственных фаз, Pd наблюдается в виде изоморфной примеси в составе пентландита. Микронзондовым методом в пентландите установлено 360 г/т Pd (Microspres-4DW, экспозиция 120 с, среднее из трех измерений). Расчеты показывают, что с учетом среднего химического состава руды и состава пентландита изученная проба содержит 0.7% такого пентландита, и на его долю приходится около половины содержания Pd в общем балансе изученной руды.

Столь высокие содержания Pd обычно характерны для пентландитов, находящихся в ассоциации с мончеитом – Pt-членом серии, но не с меренскиитом – Pd-членом [10].

Таким образом, видовой минеральный состав платиноидов малосульфидного оруденения Йоко-Довыренского массива во многом подобен составу руд известных месторождений подобного типа (Стиллуотер, Потгитерсрюс в Бушвельде, Федорово-Панские тундры). В то же время имеющиеся данные свидетельствуют и об индивидуальных особенностях рассматриваемого оруденения, среди которых можно отметить, во-первых, широкое развитие сплавов Pt с Fe (тетраферроплатина) и Pd с Hg (потарит), во-вторых, отсутствие сульфидов платиновых металлов, таких, как высокоцит, брэггит, куперит, в-третьих, отсутствие ЭПГ-содержащих сульфоарсенидов ряда кобальтина-герсдорфита, а также самостоятельных фаз Rh и его изоморфных примесей в других минералах.

Согласно распространенным в настоящее время представлениям в переносе, концентрировании и последовательном образовании различных соединений благородных металлов в расслоенных ультрабазит-базитовых комплексах ведущая роль принадлежит высокотемпературным магматическим флюидам. Анализируя размещение в разрезе Йоко-Довыренского массива малосульфидного платинометалльного оруденения, важно

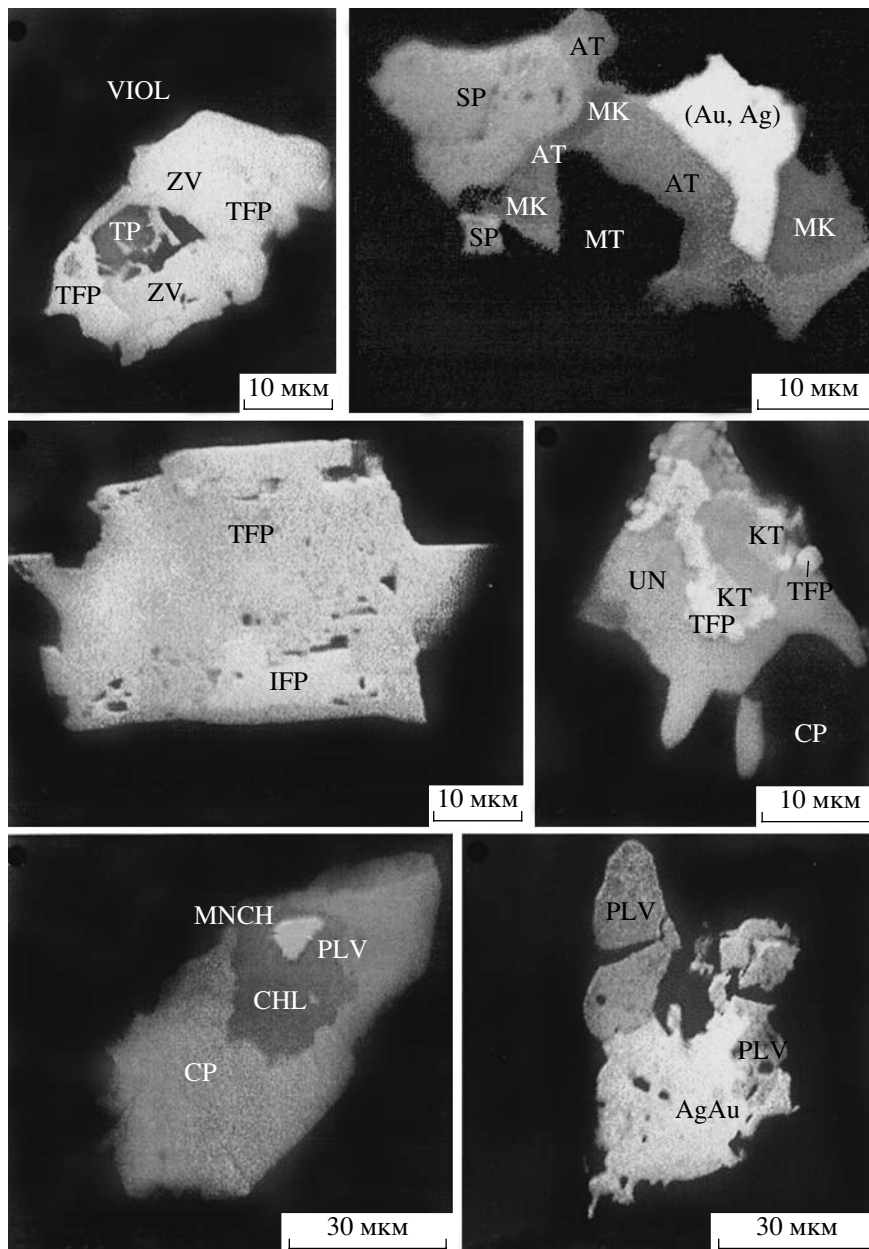


Рис. 1. Микрофотографии сростков зерен минералов благородных металлов из “тяжелого” концентрата анортозитов. РЭМ в режиме обратноотраженных электронов.

TR – теларгпалит, ZV – звягинцевит, TFR – тетраферроплатина, SP – сперрилит, МК – маякит, АТ – атокит, IFR – изоферроплатина, КТ – котульскит, MNCH – мончеит, PLV – паоловит, UN – неназванная фаза $((Pd, Hg)_2Cu, Fe)S(Te, Pb)$, (Au, Ag) – золото самородное, AgAu – серебро самородное, CP – халькопирит, VIOL – виоларит, MT – магнетит, CHL – хлорит.

отметить его приуроченность к границам зон в расслоенной серии, где происходит смена состава кумулюсных парагенезисов. Наиболее приемлемое объяснение этому можно предложить, на наш взгляд, в рамках гипотезы компакций [11, 12], согласно которой зоны смены кумулятов являются областями разуплотнения и повышенной пористости кумулюса вследствие смены на ликвидусе более плотных минералов (оливин, хром-

шпинелид) на менее плотные (плаггиоклаз). Этот слой представляет собой своеобразную ловушку для флюидов, отделяющихся при кристаллизации интеркумулюсного расплава, выжимаемого из нижележащих горизонтов.

Такой интеркумулюсный расплав кристаллизовался при взаимодействии с сосуществующим с ним ограниченным объемом сульфидной жидкос-

ти и обогащенной хлором [4] флюидной фазой, содержащей Te, As, Hg, Sb. Наличие минералов с Pb, Sn, Ag указывает на возможную контаминацию расплава коровым материалом. Подтверждением этого могут служить данные по изучению изотопов He и Ar в газовой-жидкой микровключенных пород и минералов по разрезу Йоко-Довыренского массива [13]. Восстановленный характер флюидов, преимущественно метано-водородный состав [14], обуславливает кристаллизацию сплавов и самородных металлов. Обогащенность флюидной фазой платиноносного рифа согласуется с широким распространением здесь такситовых текстур и обильным развитием жильных пород (анортозиты, габбро-пегматиты).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 01-05-97257, 01-05-64252, 02-05-64219).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистлер В.В., Степин А.Г. // ДАН. 1993. Т. 328. № 4. С. 498–501.
2. Kislov E.V., Orsoev D.A. // IAGOD Newslett. 1993. P. 23.
3. Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсов Д.А. // Геология руд. месторождений. 1994. Т. 36. № 6. С. 545–553.
4. Орсов Д.А., Кислов Е.В., Конников Э.Г. и др. // ДАН. 1995. Т. 340. № 3. С. 225–228.
5. Неймарк Л.А., Немчин А.А., Амелин Ю.В. и др. XII Всесоюз. симп. по стабильным изотопам в геохимии. М., 1989. С. 323–324.
6. Кислов Е.В., Конников Э.Г., Посохов В.Ф., Шалагин В.Л. // Геология и геофизика. 1989. № 9. С. 140–144.
7. Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Rudashevsky V.N. In: European Union of Geosciences. EUG XI. 8–12 April. 2001. Abstrs. Strasbourg, 2001. P. 100.
8. Rudashevsky N.S., Garuti G., Kretser Y.L., Rudashevsky V.N., Zaccarini F. In: XXV AGM Mineral Deposits Studies Group. 3–4 January 2002. Abstrs. Southampton: Southampton Oceanography Centre, 2002. P. 5.
9. Рудашевский Н.С., Лунал С.Д., Рудашевский В.Н. Пат. РФ № 216530. М., 2001.
10. Балабонин Н.Л., Субботин В.В., Скиба В.И. и др. // Обогащение руд. 1998. № 6. С. 24–30.
11. Meurer W.P., Boudreau A.E. // J. Geol. 1996. V. 104. P. 115–120.
12. Boudreau A.E., Meurer W.P. // Contribs Mineral. and Petrol. 1999. V. 134. P. 174–185.
13. Конников Э.Г., Прасолов Э.М., Токарев И.В. и др. // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 6. С. 543–552.
14. Конников Э.Г., Неручев С.С., Прасолов Э.М. и др. В сб.: Платина России. М.: Геоинформмарк, 1999. Т. 4. С. 169–176.