
**ПЕРВЫЕ НАХОДКИ МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ
В УЛЬТРАМАФИТАХ КЫЗЫР-БУРЛЮКСКОГО МАССИВА
(ЗАПАДНЫЙ САЯН)**

© 2021 г. А. Н. Юричев¹, *, А. И. Чернышов¹, Е. В. Корбовяк¹

¹*Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия*

**e-mail: juratur@sibmail.com*

Поступила в редакцию 07.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 22.06.2021 г.

В дунитах и аподунитовых серпентинитах Кызыр-Бурлюкского ультрамафитового массива, входящего в состав Куртушибинского офиолитового пояса, впервые обнаружены минералы платиновой группы (МПГ). Охарактеризованы две группы МПГ: Os–Ir–Ru и Pt–Pd, с существенным преобладанием последней. Ведущая роль в составе твердых растворов первой группы осмия свидетельствует о важной роли этого элемента на ранних стадиях рудного процесса и его мобилизации из материнского лерцолитового субстрата. В массиве также выявлены более поздние сульфиды редких элементов платиновой группы (Ru, Os, Ir) с примесями Cu, Ni и Fe, составы которых соответствуют формулам MeS , Me_4S_3 и Me_3S_2 . Отмечено, что Pd, наряду с Hg, являются характерными элементами рудоформирующей системы поздних платиноидов Pt–Pd специализации. Процесс формирования ассоциации МПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются твердые растворы Os–Ir–Ru и фазы состава $Pt_3(Cu, Ni)$ и $(Pt, Os, Re)_3(Ni, Fe, Cu)$. Остальные выявленные МПГ относятся к более поздним образованиям и связаны с процессами мантийно-корового метасоматоза, когда при воздействии восстановленных флюидов, обогащенных Hg и S и несущих такие элементы, как Co, Cu, Pd, Au, Ag, Cd, происходили процессы ремобилизации и переотложения элементов платиновой группы.

Ключевые слова: реститовые ультрамафиты, офиолиты, минералы элементов платиновой группы, Западный Саян, Кызыр-Бурлюкский массив

DOI: 10.31857/S0869605521040092

Метаморфические ультрамафиты Куртушибинского офиолитового пояса пользуются значительным распространением среди метаморфизованных осадочно-вулкано-генных венд-кембрийских отложений в северо-восточной части Западного Саяна (Соболев, Добрецов, 1977). Их массивы наблюдаются в виде многочисленных тектонических блоков и пластин, окруженных серпентинитовым меланжем, и имеют цепочечное расположение в ЮЗ–СВ направлении. Объектом настоящего исследования является слабо изученный Кызыр-Бурлюкский ультрамафитовый массив, расположенный в северо-восточной части Куртушибинского офиолитового пояса (Кривенко и др., 2002; Чернышов и др., 2020) (рис. 1). В этом массиве, в отличие от других близлежащих массивов данного пояса (Эргакского и Калнинского), благороднометалльная минерализация не изучалась.

При исследовании рудной акцессорной минерализации в образцах дунитов и их серпентинизированных разновидностей из Кызыр-Бурлюкского массива, авторами

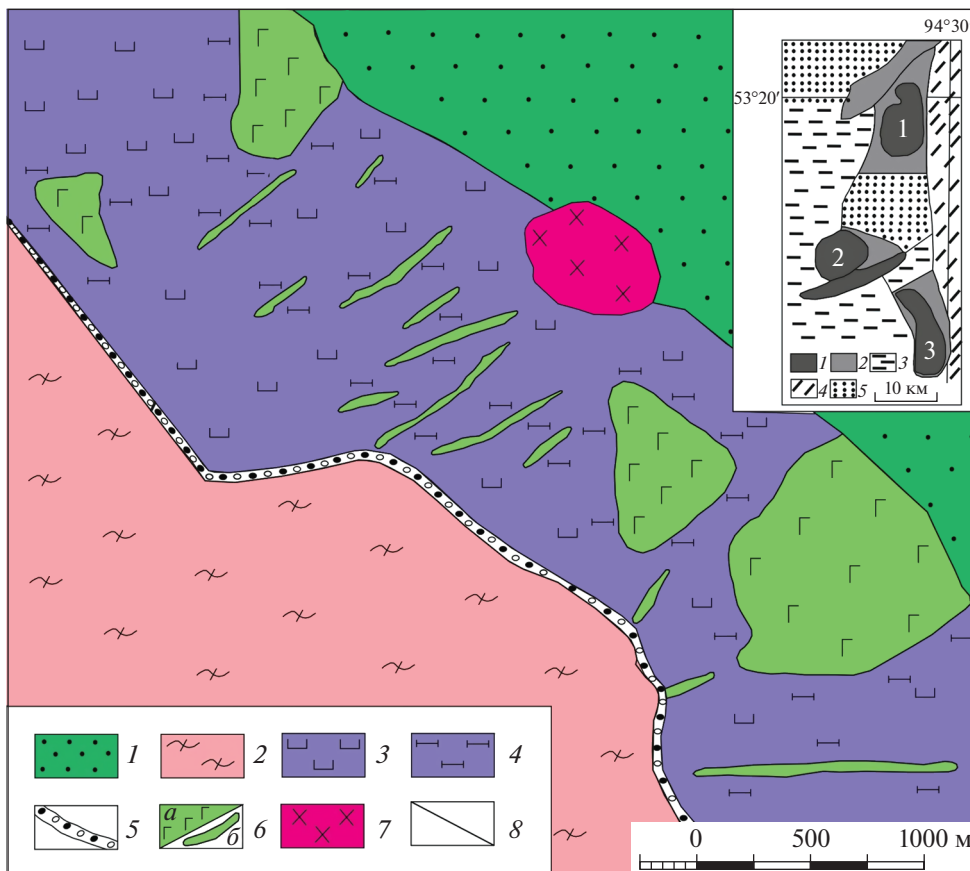


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кызыр-Бурлюкского массива (составлена С.В. Лодыгиным, с дополнениями авторов).

1 – осадочные отложения, 2 – зеленые сланцы, 3 – дуниты, 4 – верлиты, 5 – зона серпентинового меланжа, 6 – габбро (*a* – штоки, *b* – дайки), 7 – диориты, 8 – геологические границы. На врезке показана схема строения Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна (Кривенко и др., 2002): 1 – ультрамафитовые массивы (1 – Эргакский, 2 – Калнинский, 3 – Кызыр-Бурлюкский), 2 – вулканогенно-осадочные толщи (метабазалты, плагиориолиты, кремнистые, углистые и глаукофановые сланцы), 3–4 – каледонские складчатые системы (3 – Западно-Саянская, 4 – Хемчикско-Систигхемская), 5 – среднепалеозойские впадины.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kizir-Burluisky massif (compiled by S.V. Lodygin, with additions of authors).

были диагностированы микроскопические включения минералов платиновой группы (МПГ). В работе приводится типизация этих минералов, рассмотрены возможные условия и механизмы их образования.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Кызыр-Бурлюкский массив расположен на западном склоне хребта Эргак-Таргак-Тайга и слагает водораздел рр. Пряха–Кызыр–Бурлюк (правых притоков р. Амыл).

Массив имеет удлиненную форму и вытянут в северо-западном направлении с крутым погружением на северо-восток (рис. 1). Ширина выходов пород массива варьирует от 1 до 2.5 км. Вдоль юго-западного контакта массива с вмещающими породами (зелеными сланцами венд-кембрийского возраста) картируется зона серпентинитового меланжа. На северо-востоке массив перекрывается более молодыми осадочными отложениями позднесилурийского возраста.

Массив сложен реститовыми дунитами и их серпентинизированными разновидностями, с редкими жильными телами ортопироксенитов (Чернышов и др., 2020). Дуниты прорываются многочисленными мелкими субизометричными интрузивными телами и дайками габброидов. Последние имеют субнормальную ориентировку по отношению к простиранию массива и, вероятно, образовались при внедрении расплава вдоль трещин отрыва, возникших при его поперечном сдавливании. В экзоконтактных зонах габброидов часто встречаются породы верлит-клинопироксеновой ассоциации, являющиеся, вероятно, реакционно-метасоматическими образованиями, возникшими в результате воздействия высокотемпературных основных расплавов на консолидированные дуниты. В эндоконтактных зонах массива и вдоль разломов отмечается интенсивная серпентинизация (антигоритизация).

Дуниты имеют преимущественно крупнозернистое строение и обнаруживают признаки пластических деформаций, которые выражаются в неоднородном субблоковом и мозаичном погасании зерен оливина, в характерных полосах сброса и проявлении по краям зерен синтетектонической рекристаллизации. По химическому составу оливин занимает пограничное положение между форстеритом и хризолитом ($\text{Fa}_{10.5-10.9}$) (Чернышов и др., 2020) и аналогичен по составу оливину деплетированной мантии (Workman, Hart, 2005). Хромшпинелиды встречаются редко в виде аксессуарной вкрапленности мелких (<0.5 мм) зерен субизометричной, реже эвгдральной формы и по составу отвечают преимущественно магнезиохромиту, реже хромиту с повышенным содержанием Al и Fe^{3+} .

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав рудных минералов изучался в плоскопараллельных аншлифах толщиной 3–4 мм, которые напылялись слоем углерода толщиной 25–30 нм, с помощью электронных сканирующих микроскопов Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным детектором UltimMax100 (Oxford Instruments), Tescan Vega II LMU с энергодисперсионной (с детектором Si(Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионной INCA Wave 700 приставками (ЦКП “Аналитический центр геохимии природных систем” ТГУ, Томск). Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ, текущем токе 15 нА и времени набора спектра 120 с. Диаметр пучка зонда составил 1–2 мкм. В качестве стандартов для Ru, Os, Ir, Re, Rh, Pd, Pt, Au, Ag, Ni, Co, Cu, Fe, Cd и Sb были применены чистые металлы, для S – пирит, для Hg – HgTe. Используются аналитические линии: $L\alpha$ для Ru, Ir, Re, Rh, Pt, Au, Ag, Cd, Sb; $K\alpha$ для S, Fe, Ni, Co, Cu; $M\alpha$ для Os, Hg.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МПГ В ПОРОДАХ МАССИВА

В изучаемом массиве МПГ были обнаружены только в дунитах и аподунитовых серпентинитах. В ортопироксенитах, верлитах и габброидах данный тип минерализации не выявлен.

МПГ наблюдаются преимущественно в виде гипидиоморфных или неправильных по форме микроскопических выделений (0.5–3 мкм, отдельные зерна до 10 мкм), образующих включения в зернах магнетита, значительно реже – аваруита. В зернах оливина, пироксенов и хромшпинелидов и их сростаниях МПГ не обнаружены.

По химическому составу МПГ подразделяются на две группы: (1) минералы с примесями редких элементов платиновой группы – рутения, осмия и иридия (РЭПГ) и (2) минералы Pt–Pd (последние преобладают). В состав первой группы входят твердые растворы, сульфиды, состав которых соответствует формулам MeS , Me_4S_3 и Me_3S_2 , а также фаза состава $(\text{Pt,Os,Re})_3(\text{Ni,Fe,Cu})$. Ко второй группе относятся фаза состава $\text{Pt}_3(\text{Cu,Ni})$, интерметаллиды состава $(\text{Pt,Pd,Au})_2\text{Cu}$, $(\text{Pt,Pd,Au})_3\text{Cu}$ и $(\text{Fe,Pd,Au})\text{Cu}$, потарит PdHg и фазы состава $(\text{Pd,Ni})(\text{Hg,S})$ и $(\text{Pd,Ag})(\text{Hg,Cd,S})$.

МИНЕРАЛЫ ЭПГ

Твердые растворы РЭПГ. Эта соединения являются обычными для реститовых ультрамафитов и хромититов офиолитовых комплексов. Они встречены как в дунитах, так и в аподунитовых серпентинитах Кызыр-Бурлюкского массива в виде микроскопических (размером до 0.3 мкм) включений в сульфиде (рис. 2, *a–b*). Состав твердых растворов РЭПГ изучен в двух образцах. В образце дунита – это симплектитовые выделения твердого раствора (Os,Ir,Ru) в сульфиде с формулой MeS (рис. 2, *a*), в образце серпентинита – микроскопические включения твердого раствора (Ir,Ru,Rh) в сульфиде с формулой Me_4S_3 (рис. 2, *b*). Отмечено, что доминирующие в составе твердого раствора осмий и иридий (для образцов дунита и серпентинита соответственно) уступают ведущую роль в сульфиде рутению. При этом иридий нередко полностью отсутствует в химическом составе сульфида (табл. 1). Ранее подобные твердые растворы с ведущей ролью осмия и/или иридия были описаны во вкрапленных хромитовых рудах Калнинского ультрамафитового массива, расположенного рядом с Кызыр-Бурлюкским массивом и также входящим в состав Куртушибинского офиолитового пояса (Кривенко и др., 2002; Юричев, Чернышов, 2019) (рис. 3).

Сульфиды РЭПГ. Представлены тремя включениями в магнетите. Одно из них, как уже отмечалось ранее (рис. 2, *a*), является сульфидом с формулой MeS , где в катионной группе наряду с Ni и Co присутствуют Ru и Os (табл. 1), второе (рис. 2, *b*) – сульфидом с формулой Me_4S_3 , где в катионной группе наряду с Ni, Co, Fe постоянно присутствуют Ru и Rh, значительно реже – Ir (табл. 1). Размер этих включений достигает 3 мкм, они характеризуются высокой степенью идиоморфизма с хорошо выраженными гранями. В сростаниях с Me_4S_3 сульфидами обнаружены более мелкие выделения кобальтистого перлантита и аваруита, заключенные в более крупных ксеноморфных выделениях магнетита (рис. 2, *b*). Третье включение сульфида в магнетите имело размер меньший, чем диаметр зонда (0.3 мкм), поэтому оно идентифицировалось на основе качественного анализа и, предположительно, имеет формулу Me_3S_2 , где в катионной группе наряду с Ni, Co, Cu и Fe важную роль играет иридий и присутствует палладий (табл. 1). Обсуждаемое включение представлено сростком двух округлых выделений и приурочено к трещине в магнетите (рис. 2, *b*).

Фаза $(\text{Pt,Os,Re})_3(\text{Ni,Fe,Cu})$ обнаружена в виде неправильных по форме, каплевидных микроскопических (размером до 0.4 мкм) включений в зернах, соответствующих по составу фазе $\text{Pt}_3(\text{Cu,Ni})$, в аподунитовых серпентинитах (рис. 2, *c*). Состав этих включений определен приблизительно на основе качественного анализа. Наряду с Pt и Os эти включения содержат Re (до 3.1 мас. %), Ni (до 3.5 мас. %), Cr (до 2.6 мас. %) и Fe (до 2.7 мас. %) (табл. 2).

Фаза $\text{Pt}_3(\text{Cu,Ni})$ отмечается в виде мелких (2–3 мкм) неправильных по форме зерен исключительно внутри выделений магнетита как в дунитах, так и в аподунитовых серпентинитах (рис. 2, *c–d*). Эти зерна содержат примеси Cu и Ni (до 9.0 мас. % и до 5.9 мас. % соответственно). С учетом стехиометрии, данная фаза может выступать медно-никелевым аналогом изоферроплатины. Состав этой фазы из дунитов отличается от такового из аподунитовых серпентинитов меньшим содержанием Ni при большем содержании Cu (табл. 2). Внутри отдельных зерен фазы в аподунитовых серпентинитах наблюдаются микроскопические включения состава $(\text{Pt,Os,Re})_3(\text{Ni,Fe,Cu})$

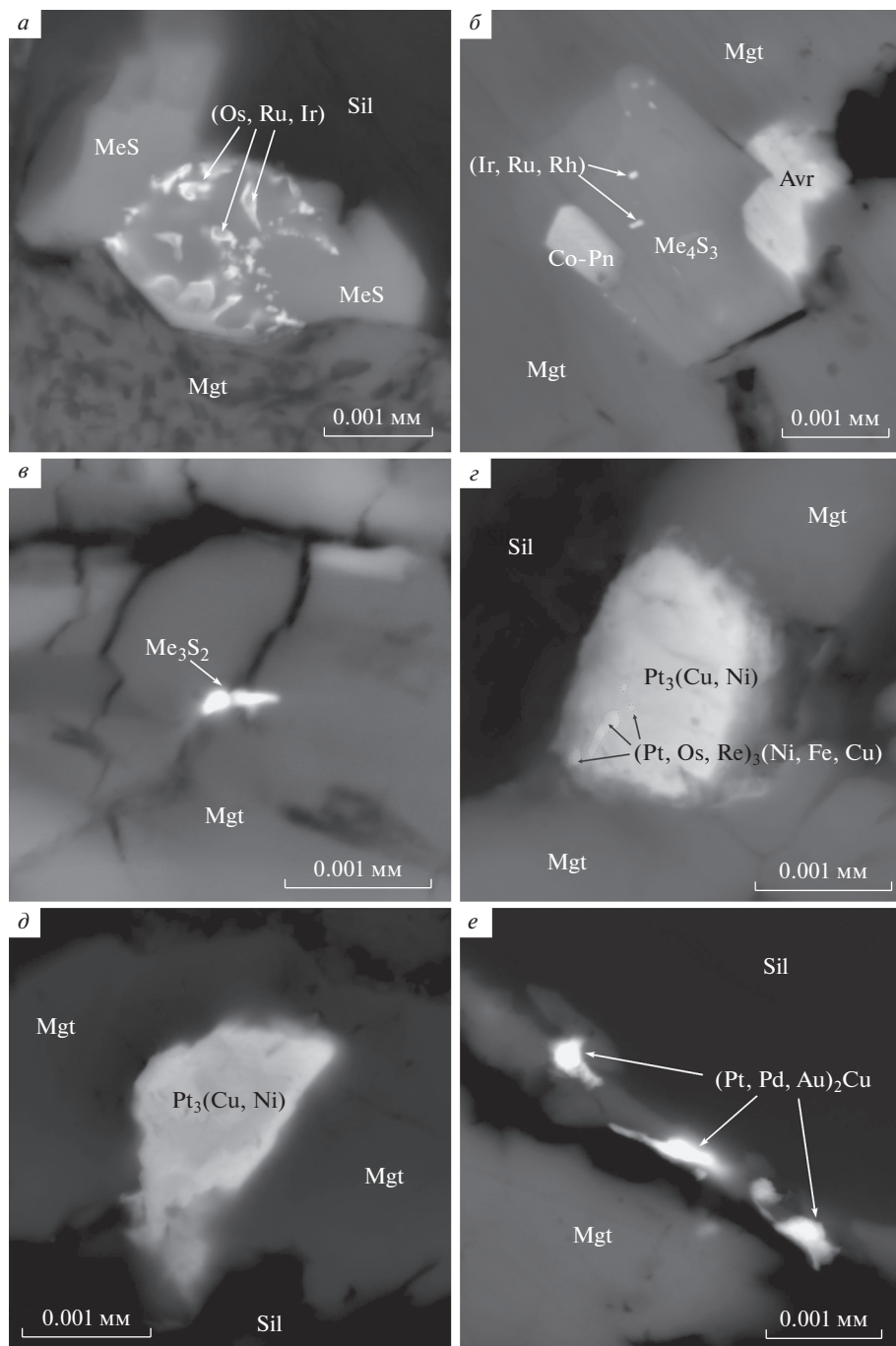


Рис. 2. Аксессуарная платинометалльная минерализация из дунитов (*a, в, д, e*) и аподунитовых серпентинитов (*б, з*) Кызыр-Бурлюкского массива. Фото в отраженных электронах. Co-Pn – кобальтистый пентландит, Avr – аварунит, Mgt – магнетит, Sil – силикатная матрица, представленная лизардит-хлоритовым агрегатом.
Fig. 2. Accessory platinum-metal mineralization in dunites (*a, в, д, e*) and apodunite serpentinites (*б, з*) of the Kizir-Burluisky massif. BSE images.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) минералов РЭПГ из дунитов и аподунитовых серпентинитов Кызыр-Бурлюкского массива
Table 1. Chemical composition (wt %) of rare platinum group minerals from dunitites and apodunite serpentinites of the Kizir-Burluksky massif

Образец	Ru	Os	Ir	Re	Rh	Pd	Pt	Ni	Co	Cu	Fe	Hg	S	Сумма	Формула
Твердые растворы Os-Ir-Ru															
7007-7-127	20.87	67.70	11.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.81	(Os _{0.57} Ru _{0.33} Ir _{0.10}) _{1.00}
7007-7-128	36.70	53.14	9.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	98.99	(Ru _{0.53} Os _{0.40} Ir _{0.07}) _{1.00}
7007-7-129	24.06	64.25	11.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.68	(Os _{0.53} Ru _{0.38} Ir _{0.09}) _{1.00}
7024/1-6-89	32.74	—	57.79	—	9.54	—	—	—	—	—	—	—	—	100.07	(Ru _{0.45} Ir _{0.42} Rh _{0.13}) _{1.00}
7024/1-6-90	30.54	—	59.69	—	9.21	—	—	—	—	—	—	—	—	99.44	(Ir _{0.44} Ru _{0.43} Rh _{0.13}) _{1.00}
Сульфиды MeS															
7007-7-125	10.41	2.51	—	—	—	—	—	28.20	27.21	—	—	—	31.19	99.52	(Ni _{0.49} Co _{0.47} Ru _{0.11} Os _{0.01}) _{1.08} S _{0.92}
7007-7-126	9.84	3.54	—	—	—	—	—	28.61	26.80	—	—	—	31.50	100.28	(Ni _{0.49} Co _{0.46} Ru _{0.10} Os _{0.02}) _{1.07} S _{0.93}
Сульфиды Me ₄ S ₃															
7024/1-6-91	2.81	—	—	—	0.78	—	—	24.18	10.61	—	31.88	1.09	28.19	99.55	(Fe _{1.93} Ni _{1.39} Co _{0.61} Ru _{0.09} Rh _{0.03}) _{4.05} S _{2.93} Hg _{0.02}) _{2.95}
7024/1-6-92	2.68	—	—	—	0.76	—	—	24.59	10.65	—	31.76	—	28.47	98.91	(Fe _{1.92} Ni _{1.41} Co _{0.61} Ru _{0.09} Rh _{0.02}) _{4.05} S _{2.95}
7024/1-6-95	2.76	—	1.21	—	0.67	—	—	23.84	10.87	—	31.07	—	29.04	99.46	(Fe _{1.84} Ni _{1.35} Co _{0.61} Ru _{0.09} Rh _{0.02} Ir _{0.02}) _{3.93} S _{3.07}
Сульфиды Me ₃ S ₂ *															
7006-10-141	—	—	26.75	—	—	0.58	—	21.72	—	3.49	25.63	—	22.38	100.55	
7006-10-142	—	—	25.32	—	—	—	—	23.21	1.75	2.00	26.15	—	22.42	100.85	
7015-8-150	—	22.43	—	2.39	—	—	66.38	3.55	—	2.67	2.68	—	—	100.10	
7015-8-151	—	29.20	—	3.11	—	—	59.54	4.03	—	2.61	2.20	—	—	100.68	

Примечание. * Из-за малых размеров минеральных выделений данные химического анализа представляют собой суммы составов изучаемого минерала и вмещающего его минерала.

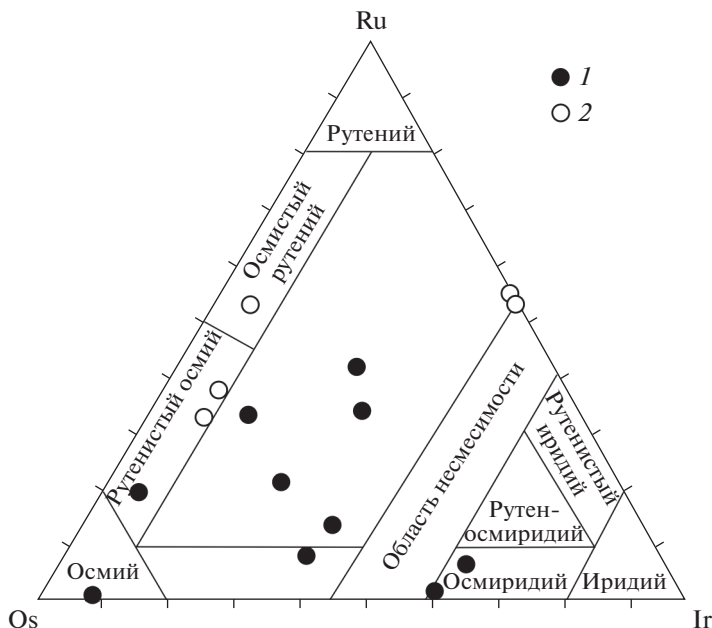


Рис. 3. Тройная диаграмма состава твердых растворов системы Os–Ir–Ru из Калнинского (1) (Кривенко и др., 2002) и Кызыр-Бурлюкского (2) массивов Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна.
Fig. 3. Composition of Os–Ir–Ru solid solutions in the Kalninsky massif (1) (Krivenko et al., 2002) and Kizir-Burluksky massif (2) from the Kurtushibin ophiolite belt of Western Sayan Mountains.

(рис. 2, *з*). Ранее выделения с близким химическим составом были диагностированы в шлихе из аллювия притока р. Эргак, размывающего зону вкрапленного хромитового оруденения Эргакского ультрамафитового массива Куртушибинского офиолитового пояса (Кривенко и др., 2002; Кривенко и др., 2005).

Интерметаллиды $(Pt, Pd, Au)_2Cu$, $(Pt, Pd, Au)_3Cu$ и $(Fe, Pd, Au)Cu$ наблюдаются более ограниченно, в основном в виде мелких (размером до 2 мкм) неправильных включений в зернах магнетита (рис. 2, *е*; рис. 4, *а*). Первый и второй виды интерметаллидов обнаружены только в магнетите из дунитов, третий – только в магнетите из аподунитовых серпентинитов (табл. 2).

Потарит PdHg встречается только в дунитах и является наиболее распространенным минералом из выделенных минералов ЭПГ в этих породах. Он наблюдается в виде гипидиоморфных зерен размером до 1.5 мкм в магнетите и аваруите (рис. 4, *б–д*). В химическом составе потарита помимо типичной для этого минерала примеси меди зафиксированы примеси золота, серебра и платины (табл. 2). Следует отметить, что примеси серебра и золота характерны для включений потарита в магнетите, а примесь платины – для включений потарита в аваруите. Возможно, речь идет о тонкодисперсных включениях фаз, содержащих эти элементы. На это указывает, в частности, обнаружение внутри потарита обособленного выделения твердого раствора (Cu, Pt, Au) (рис. 4, *в*).

Фаза $(Pd, Ni)(Hg, S)$, занимающая по составу промежуточное положение между потаритом и высокоцитом, обнаружена только в дунитах в виде очень мелких (размером до 0.3 мкм) гипидиоморфных включений в неправильных выделениях магнетита (рис. 4, *е*; табл. 2). В связи с малыми размерами включений, их состав определялся приближи-

Таблица 2. Химический состав (мас. %) минералов ЭПГ (Pt–Pd специализации) из дунитов и аподунитовых серпентинитов Кызыр-Бурлюкского массива

Образец	Pd	Pt	Ag	Au	Ni	Co	Cu	Fe	Cd	Sb	Hg	S	Сум- ма	Формула
Фаза $Pt_{3-x}(Cu,Ni)_{1+x}$														
7006-17-218	–	89.06	–	–	2.05	–	7.81	–	–	–	–	–	98.92	$Pt_{2.97}(Cu_{0.23}Ni_{0.80})_{1.03}$
7006-17-219	–	88.85	–	–	2.94	–	8.38	–	–	–	–	–	100.17	$Pt_{2.81}(Cu_{0.33}Ni_{0.86})_{1.19}$
7006-17-220	–	89.64	–	–	1.93	–	7.37	–	–	–	–	–	98.94	$Pt_{3.03}(Cu_{0.21}Ni_{0.76})_{0.97}$
7015-8-149	–	90.65	–	–	5.40	–	4.14	–	–	–	–	–	100.19	$Pt_{2.99}(Cu_{0.59}Ni_{0.42})_{1.01}$
7006-17-222	–	88.47	–	–	2.12	–	8.02	–	–	–	–	–	98.62	$Pt_{2.93}(Cu_{0.24}Ni_{0.83})_{1.07}$
7015-8-148	–	89.72	–	–	5.88	–	4.60	–	–	–	–	–	100.20	$Pt_{2.88}(Cu_{0.65}Ni_{0.47})_{1.12}$
(Pt,Pd,Au) ₂ Cu, (Pt,Pd,Au) ₃ Cu														
7006-6-84	9.85	64.41	–	10.09	–	–	15.29	–	–	–	–	–	99.64	$(Pt_{1.37}Pd_{0.39}Au_{0.21})_{1.97}Cu_{1.00}$
7006-6-85	9.12	67.28	–	8.47	–	–	15.27	–	–	–	–	–	100.13	$(Pt_{1.44}Pd_{0.36}Au_{0.18})_{1.98}Cu_{1.00}$
7006-6-88	11.60	73.10	–	4.50	–	–	10.64	–	–	–	–	–	99.84	$(Pt_{2.24}Pd_{0.65}Au_{0.13})_{3.02}Cu_{1.00}$
(Fe,Pd,Au)Cu														
7029-12-139	10.89	1.70	–	12.71	0.37	–	45.80	27.80	–	0.44	–	–	99.70	$(Fe_{0.69}Pd_{0.14}Au_{0.09}Pt_{0.01}Ni_{0.01})_{0.94}Cu_{1.00}$
7029-12-144	9.86	1.42	–	11.27	–	–	45.49	30.4	–	0.33	–	–	98.78	$(Fe_{0.76}Pd_{0.13}Au_{0.08}Pt_{0.01})_{0.98}Cu_{1.00}$
Погаруг PdHg														
7006-12-234	32.64	9.04	–	–	–	–	–	–	–	–	57.59	–	99.27	$(Pd_{1.07}Pt_{0.16})_{1.23}Hg_{1.00}$
7006-12-177	33.73	6.38	–	–	–	–	–	–	–	–	59.47	–	99.58	$(Pd_{1.07}Pt_{0.11})_{1.18}Hg_{1.00}$
7006-12-179	34.06	4.28	–	–	–	–	–	–	–	–	61.92	–	100.26	$(Pd_{1.04}Pt_{0.07})_{1.11}Hg_{1.00}$
7006-12-237	33.92	3.37	–	–	–	–	–	–	–	–	61.65	–	98.93	$(Pd_{1.04}Pt_{0.05})_{1.09}Hg_{1.00}$
7006-12-238	33.92	4.63	–	–	–	–	–	–	–	–	61.36	–	99.92	$(Pd_{1.04}Pt_{0.08})_{1.12}Hg_{1.00}$
7006-2-35	34.95	–	3.67	–	–	–	0.56	–	–	–	61.75	–	100.93	$(Pd_{1.06}Ag_{0.11}Cu_{0.03})_{1.20}Hg_{1.00}$
7006-2-36	34.44	–	3.42	–	–	–	0.53	–	–	–	62.35	–	100.74	$(Pd_{1.04}Ag_{0.10}Cu_{0.02})_{1.16}Hg_{1.00}$
7006-2-38	35.06	–	3.66	–	–	–	0.69	–	–	–	61.80	–	101.21	$(Pd_{1.07}Ag_{0.11}Cu_{0.03})_{1.21}Hg_{1.00}$

Таблица 2. Окончание

Образец	Pd	Pt	Ag	Au	Ni	Co	Cu	Fe	Cd	Sb	Hg	S	Сум- ма	Формула
7006-7-106	34.70	-	-	2.32	-	-	-	-	-	-	62.22	-	99.24	$(Pd_{1.05}Au_{0.04})_{1.09}Hg_{1.00}$
7006-7-107	34.82	-	-	2.03	-	-	-	-	-	-	62.00	-	98.85	$(Pd_{1.06}Cu_{0.03})_{1.09}Hg_{1.00}$
7006-7-108	34.36	-	-	2.09	-	-	-	-	-	-	62.43	-	98.88	$(Pd_{1.03}Au_{0.03})_{1.06}Hg_{1.00}$
7006-12-239	35.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64.54	-	99.67	$Pd_{1.02}Hg_{0.98}$
7006-13-184	31.84	-	-	-	-	3.06	-	-	-	-	64.40	-	99.29	$(Pd_{0.93}Cu_{0.14})_{1.07}Hg_{0.93}$
7006-12-178	24.86	10.35	-	3.36	-	11.44	-	-	-	-	49.32	-	99.33	$Pd_{0.94}(Cu_{0.73}Pt_{0.22}Au_{0.07})_{1.02}Hg_{1.00}$
(Pd,Ni)(Hg,S)*														
7006-14-193	29.92	-	-	-	9.88	-	-	-	-	-	54.68	5.20	99.68	$(Pd_{0.65}Ni_{0.38})_{1.03}(Hg_{0.63}S_{0.37})_{1.00}$
7006-14-194	29.48	-	-	-	10.20	-	-	-	-	-	54.96	5.30	99.95	$(Pd_{0.63}Ni_{0.39})_{1.02}(Hg_{0.62}S_{0.37})_{0.99}$
7006-14-195	29.42	-	-	-	10.06	-	-	-	-	-	54.05	5.46	98.99	$(Pd_{0.63}Ni_{0.39})_{1.02}(Hg_{0.61}S_{0.39})_{1.00}$
7006-16-210	33.21	-	-	-	2.44	-	-	-	-	-	64.04	-	99.68	$(Pd_{0.97}Ni_{0.13})_{1.10}Hg_{0.90}$
7006-16-211	31.81	-	-	-	2.89	-	0.97	-	-	-	62.85	1.21	99.72	$(Pd_{0.85}Ni_{0.14}Cu_{0.04})_{1.03}(Hg_{0.89}S_{0.11})_{1.00}$
7006-16-212	33.02	-	-	-	2.30	-	-	-	-	-	64.44	-	99.76	$(Pd_{0.96}Ni_{0.12})_{1.08}Hg_{0.92}$
(Pd,Ag)(Hg,Cd,S)														
7024/1-2-41	34.19	-	5.12	-	2.05	1.98	0.62	-	6.48	-	45.95	3.77	100.16	$(Pd_{0.79}Ag_{0.12}Ni_{0.09}Co_{0.08}Cu_{0.02})_{1.10}(Hg_{0.57}S_{0.29}Cd_{0.14})_{1.00}$
7024/1-2-42	35.80	-	5.27	-	-	-	0.45	-	7.06	-	50.82	-	99.40	$(Pd_{1.06}Ag_{0.15}Cu_{0.02})_{1.23}(Hg_{0.80}Cd_{0.20})_{1.00}$
7024/1-2-45	34.91	-	5.16	-	1.71	1.44	0.62	-	6.60	-	47.17	2.56	100.17	$(Pd_{0.88}Ag_{0.13}Ni_{0.08}Co_{0.06}Cu_{0.02})_{1.17}(Hg_{0.63}S_{0.21}Cd_{0.16})_{1.00}$
7024/1-3-48	35.47	-	5.36	-	0.96	0.89	0.51	-	6.65	-	47.71	1.83	99.38	$(Pd_{0.94}Ag_{0.14}Ni_{0.04}Co_{0.04}Cu_{0.02})_{1.18}(Hg_{0.67}Cd_{0.17}S_{0.16})_{1.00}$
7024/1-3-49	36.15	-	5.37	-	0.90	0.71	0.49	-	6.97	-	47.59	1.53	99.71	$(Pd_{0.98}Ag_{0.14}Ni_{0.04}Co_{0.03}Cu_{0.02})_{1.21}(Hg_{0.68}Cd_{0.18}S_{0.14})_{1.00}$
7024/1-4-55	37.25	-	4.39	-	-	-	-	-	12.99	-	44.88	-	99.51	$(Pd_{1.03}Ag_{0.12})_{1.15}(Hg_{0.66}Cd_{0.34})_{1.00}$
7024/1-4-56	37.13	-	4.11	-	-	-	-	-	12.64	-	45.70	-	99.58	$(Pd_{1.02}Ag_{0.11})_{1.13}(Hg_{0.67}Cd_{0.33})_{1.00}$

Примечание. * В связи с микроскопическими размерами включений идентификация фазы выполнена на основе суммарного химического состава изучаемого минерала и вмещающего его магнетита, путем исключения из состава хрома и железа.

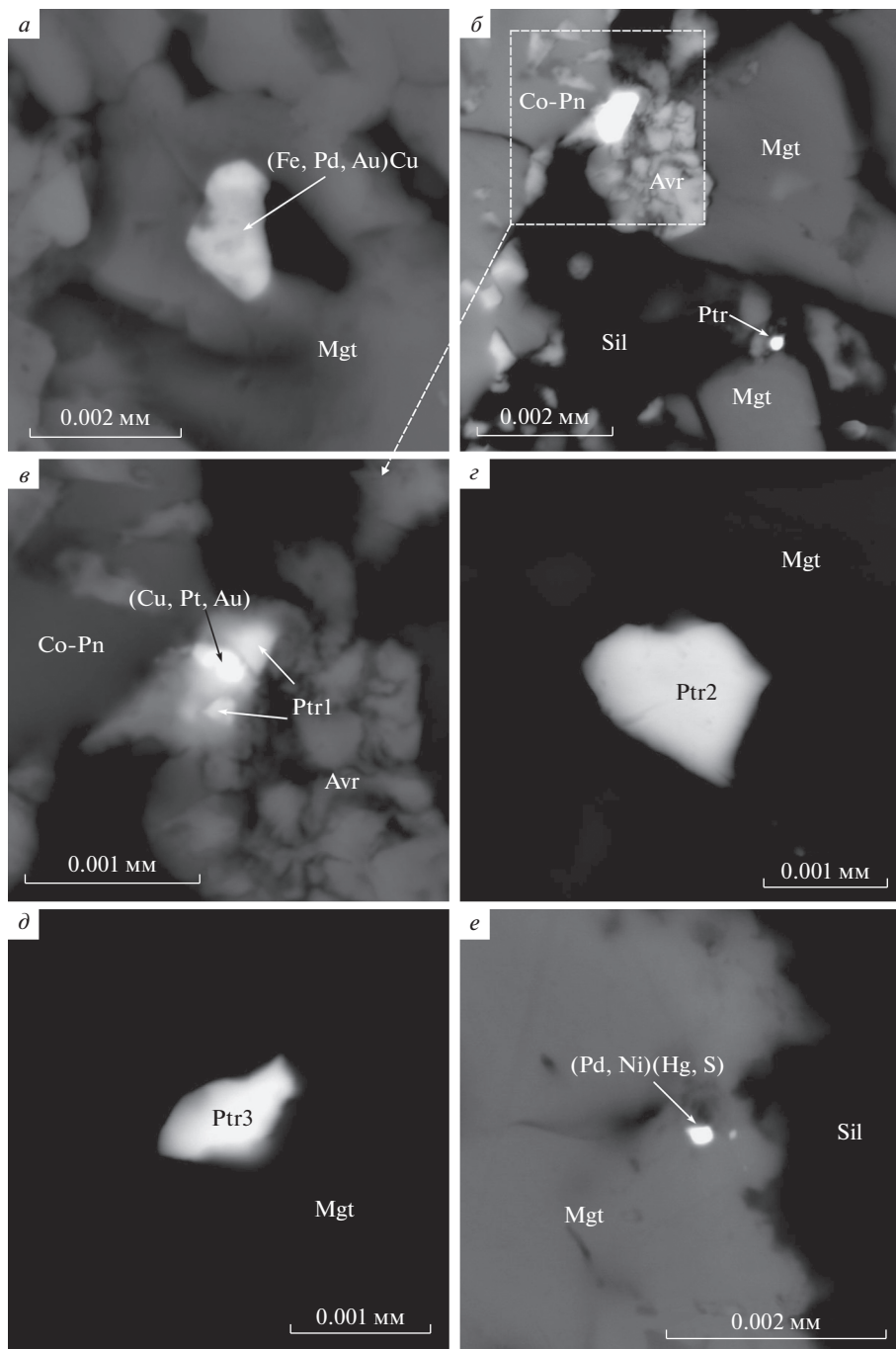


Рис. 4. МПГ Pt–Pd специализации в дунитах (*б–е*) и аподунитовых серпентинитах (*а*) Кызыр-Бурлюкского массива. Фото в отраженных электронах. Ptr – “классический” потарит с примесью меди, Ptr1 – потарит с примесью платины, Ptr2 – потарит с примесью серебра, Ptr3 – потарит с примесью золота.

Fig. 4. Pt–Pd PGM in dunites (*б–е*) and apodunite serpentinites (*а*) of the Kizir-Burluksky massif. BSE images.

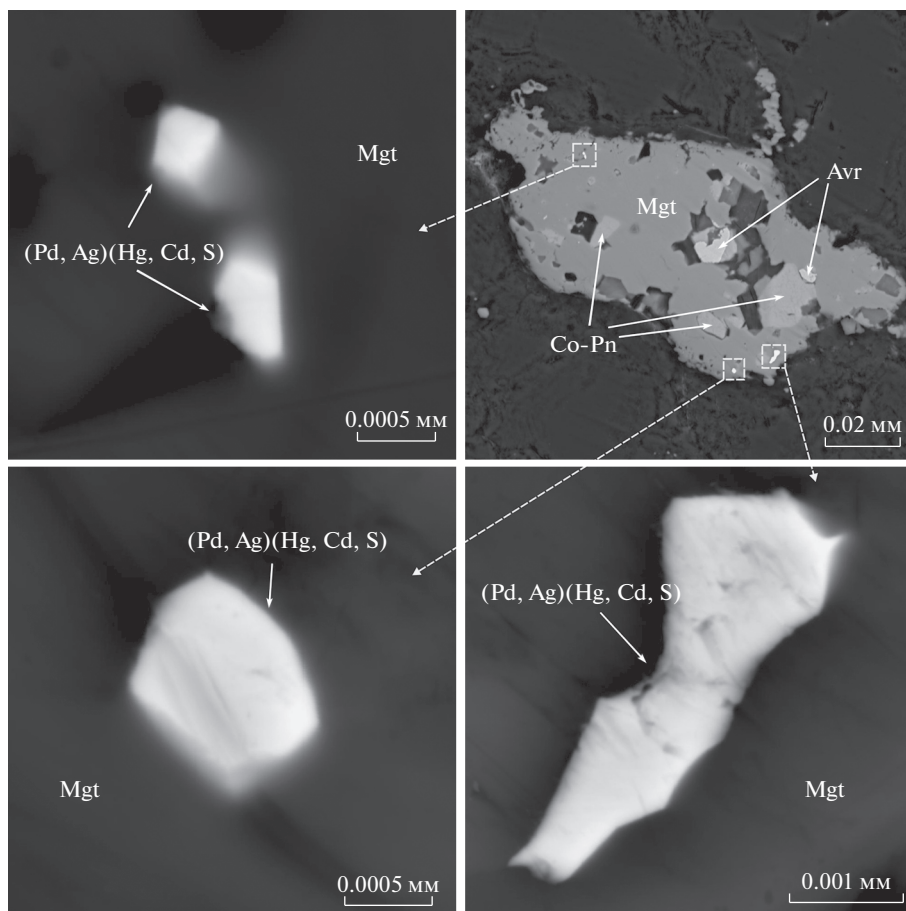


Рис. 5. Микровключения фазы (Pd,Ag)(Hg,Cd,S) в выделениях магнетита из аподунитового серпентинита Кызыр-Бурлюкского массива. Фото в отраженных электронах.

Fig. 5. Microinclusions of the phase (Pd,Ag)(Hg,Cd,S) in magnetite from apodunite serpentinite of the Kizir-Burluk-sky massif. BSE images.

тельно, на основе суммарного химического состава самого минерала и вмещающего его магнетита, путем исключения из анализа хрома и железа. Отметим, что в химическом составе вмещающего магнетита элементы, входящие в состав фазы, не выявлены.

Фаза (Pd,Ag)(Hg,Cd,S) встречается только в аподунитовых серпентинитах в виде одиночных гипидиоморфных и неправильных по форме включений размером до 4 мкм в крупных неправильных выделениях магнетита. Последний нередко обнаруживает в своем составе также включения кобальтистого пентландита и аварита (рис. 5). Помимо выделенных элементов в химическом составе фазы часто присутствует незначительная примесь никеля (до 2.0%), кобальта (до 2.0%) и меди (до 0.6%) (табл. 2).

ГЕНЕЗИС ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

В разномасштабных хромитовых проявлениях в ультрамафитовых массивах различных регионов мира практически всегда присутствует аксессуарная минерализация

ЭПГ. В хромититах Эргакского и Калнинского массивов, входящих наряду с Кызыр-Бурлюкским массивом в состав Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна, ранее была отмечена платинометальная минерализация двух типов (Подлипский, Кривенко, 2005; Юричев, Чернышов, 2019). В первом преобладают тугоплавкие платиноиды (Os–Ir–Ru) с невысокими содержаниями, во втором – установлена Pt–Pd-минерализация с высокими концентрациями, которая обнаруживает сходство с минерализацией россыпных месторождений платиноидов, ассоциирующих с зональными массивами (Урал, Корякия, Юго-Восточная Аляска) (Himmelberg, Loney, 1995; Иванов, 1997; Foley et al., 1997; Пушкарев и др., 2007; Сидоров и др., 2012; Малич и др. 2013).

Первые проведенные детальные исследования дунитов и аподунитовых серпентинитов Кызыр-Бурлюкского массива позволили выявить в его составе МПГ обоих типов, формирование которых, вероятно, происходило в несколько этапов. Твердые растворы РЭПГ, характеризующиеся осмисто-иридиевой специализацией, являются образованиями, сингенетичными с присутствующими в породах аксессуарными хромшпинелидами. Такая пространственная и генетическая связь является общепризнанной (Талхаммер, 1996; Zhou et al, 1996; Melcher et al, 1997; Пушкарев и др., 2007; Юричев и др., 2020). Концентрирование РЭПГ, по-видимому, было связано с их мобилизацией из рудно-силикатной жидкости, отделившейся от большого объема материнского лерцолитового субстрата (содержащего РЭПГ в состоянии рассеяния) в результате его частичного плавления.

Сульфиды РЭПГ с цветными металлами (Ni, Co, Cu) и железом могут быть связаны с более поздними преобразованиями первичных твердых растворов. Эти преобразования могли быть вызваны мантийным метасоматозом, в результате которого при воздействии восстановленных флюидов мантийного происхождения на дуниты происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ (Melcher et al, 1997; Garuti, Zaccarini, 1997; Ahmed, Arai, 2003; Киселева и др., 2014).

Формирование МПГ Pt–Pd специализации происходило в два этапа. К главным минералам раннего (высокотемпературного) этапа относятся фаза Pt₂(Cu,Ni) и переходная между двумя типами платинометальной минерализации фаза (Pt,Os,Re)₃(Ni,Fe,Cu). Все прочие МПГ Pt–Pd специализации относятся к второму (низкотемпературному) этапу, связанному с воздействием на ранние минералы ЭПГ восстановленных флюидов, обогащенных Hg и S и несущих такие элементы, как Ni, Cu, Pd, Au, Ag, формирование которых было связано с мантийным метасоматозом (Garuti et al., 2002; Пушкарев и др., 2007) или с процессами клинопироксенизации дунитов под воздействием более поздних габброидных интрузий, интрузирующих массив (Чернышов и др., 2020).

На восстановительную природу флюидов указывают находки в составе дунитов и аподунитовых серпентинитов самородного серебра и аваруита (Смирнова, 1970; Bezmen et al, 1991). Миграции таких флюидов способствовала система микротрещиноватости, развитие которой могло быть обусловлено экзотермическими реакциями гидратации, протекающими при серпентинизации дунитов, которые приводили к увеличению общего объема породы и возникновению напряжений (Сидоров и др., 2012).

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования позволили впервые диагностировать в породах Кызыр-Бурлюкского массива МПГ. Охарактеризованы две группы МПГ: Os–Ir–Ru и Pt–Pd, с существенным преобладанием последней. Ранее эти типы платинометальной минерализации были диагностированы в хромититах из двух других ультрамафитовых массивов (Эргакского и Калнинского), входящих в состав северо-восточной части Куртушибинского офиолитового пояса. При этом в Эргакском массиве преобладающим типом являются платиноиды Os–Ir–Ru специализации, а в Калнинском массиве – Pt–Pd. С учетом того, что в ряду массивов Эргакский → Калнинский → Кызыр-Бурлюкский степень деплетированности пород возрастает (Чернышов и др., 2019; Чернышов и др., 2020), выявленная закономерность указывает на зависимость между типом

платинометального оруденения и степенью деплетированности пород, а именно на смену ведущей роли платинометальной специализации с Os–Ir–Ru на Pt–Pd по мере увеличения степени деплетированности.

2. Ведущая роль в составе твердых растворов осмия и обнаружение фазы $(Pt, Os, Re)_3(Ni, Fe, Cu)$ в породах Кызыр–Бурлюкского массива свидетельствует о важной роли Os в ранних парагенезисах и его наиболее ранней мобилизации из материнского лерцолитового субстрата. Подобная особенность находит подтверждение и в МПГ из хромититов Калнинского массива. В хромититах Эргакского массива, содержащих дисульфиды ряда лаурит–эрликманит, твердые растворы Os–Ir–Ru не выявлены (Кривенко и др., 2005; Юричев, Чернышов, 2019; Yurichev, Chernyshov, 2020).

3. В отличие от Эргакского массива (где широко развиты дисульфиды лаурит–эрликманитового ряда) и Калнинского массива (где известны лишь единичные находки подобных минералов), в Кызыр–Бурлюкском массиве они не найдены. Однако в этом массиве выявлены более поздние сульфиды РЭПГ с примесями Cu, Ni и Fe, составы которых соответствуют формулам MeS , Me_4S_3 и Me_3S_2 . Сульфиды РЭПГ с различным стехиометрическим соотношением металл–сера ранее были описаны в хромитовых рудах Кемпирсайского (Южный Урал) и Харчерузского (Полярный Урал) ультрамафитовых массивов (Дистлер и др., 2003; Юричев и др., 2019; Юричев, 2020; Юричев и др., 2020).

4. В изученных платиноидах Pt–Pd специализации, представляющих наиболее поздние продукты замещения фаз $Pt_3(Cu, Ni)$ и $(Pt, Os, Re)_3(Ni, Fe, Cu)$, присутствуют примеси палладия и ртути. Эта особенность объясняется Hg–Pd специализацией рудной системы в период образования поздних фаз и является специфической признаком изученной ассоциации. Подобная тенденция характерна и для платиноидов Pt–Pd специализации из Калнинского массива (Подлипский, Кривенко, 2005).

5. Процесс формирования МПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются твердые растворы, характеризующиеся осмисто–иридиевой специализацией, фазы $Pt_3(Cu, Ni)$ и $(Pt, Os, Re)_3(Ni, Fe, Cu)$. Прочие МПГ могут быть связаны с более поздними изменениями первичных минералов под воздействием восстановленных мантийных либо коровых флюидов на консолидированные дуниты. Отличительной особенностью этих флюидов является обогащенность Hg, S и Co, Cu, Pd, Au, Ag, Cd, что способствовало процессам ремобилизации и перераспределения ЭПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дистлер В.В., Крячко В.В., Юдовская М.А. Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля // Геол. рудн. месторождений. **2003**. Т. 45. № 1. С. 44–74.

Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Уральский университет, **1997**. 546 с.

Киселева О.Н., Жмодик С.М., Дамдинов Б.Б., Агафонов Л.В., Белянин Д.К. Состав и эволюция платинометальной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян) // Геол. геофиз. **2014**. Т. 55. № 2. С. 333–349.

Кривенко А.П., Подлипский М.Ю., Кубышев А.И., Катанов С.Г. Перспективы хромитоносности и платиноносности гипербазитов Верхнеамьельского района в Западном Саяне / Минеральные ресурсы Красноярского края. Красноярск, **2002**. С. 314–324.

Кривенко А.П., Подлипский М.Ю., Агафонов Л.В. Рудная минерализация гипербазитов Эргакского массива и перспективы его хромитоносности / Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. Вып. 8. Кызыл: ТуВИКОПР СО РАН, **2005**. С. 32–44.

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Кнауф В.В., Мейзел Т. Минералого-геохимические ассоциации платиноидов дунит-гарцбургитовых и клинопироксенит-дунитовых массивов // Труды ИГГ УрО РАН. **2013**. Вып. 160. С. 255–260.

Подлипский М.Ю., Кривенко А.П. Платино-хромитовое оруденение в офиолитовых гипербазитах Западного Саяна / Платина России. Новые нетрадиционные типы месторождений и рудопроявлений платиносодержащего сырья. Т. 6. Москва, **2005**. С. 100–109.

Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф. Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.

Сидоров Е.Г., Козлов А.П., Толстых Н.Д. Гальмоэнанский базит-гипербазитовый массив и его платиноносность. Москва: Научный мир, 2012. 288 с.

Смирнова Т.А. Теллурическое железо в ультраосновных породах Кемпирсайского плутона // ЗВМО. 1970. Ч. 99. Вып. 6. С. 745–748.

Соболев В.С., Добрецов Н.Л. Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна). Новосибирск: Наука, 1977. 222 с.

Талхаммер Т.В. Ассоциации минералов платиновой группы в массивных хромитовых рудах Кемпирсайского офиолитового комплекса (Южный Урал) как проявление мантийного метасоматоза // ЗРМО. 1996. Ч. СХХV. № 1. С. 25–36.

Чернышов А.И., Юричев А.Н., Кичеева А.В. Петрогеохимические особенности хромитоносных ультрамафитов Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян) // Литосфера. 2019. Т. 19. № 5. С. 687–703.

Чернышов А.И., Воробьева А.В., Юричев А.Н. Петрология Кызыр-Бурлюкского мафит-ультрамафитового массива (северо-восток Западного Саяна) // Изв. Томского политехнического университета. 2020. Т. 331. № 8. С. 199–207.

Юричев А.Н. Акцессорные сульфиды из хромититов Харчерузского ультрамафитового массива, Полярный Урал // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 54–64.

Юричев А.Н., Чернышов А.И. Платиноносность хромититов Куртушибинского офиолитового пояса, Западный Саян: новые данные // ЗРМО. 2019. Т. 148. № 5. С. 113–125.

Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В. Минералы платиновой группы из хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Мугоджары, Казахстан): новые данные // ЗРМО. 2019. Т. 148. № 2. С. 76–86.

Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В. Платиноносность хромититов Харчерузского ультрамафитового массива (Полярный Урал): новые данные // ЗРМО. 2020. Т. 149. № 3. С. 38–53.

First Occurrence of Platinum Group Minerals in Ultramafites of the Kizir-Burluksky Massif (Western Sayan Mountains, Russia)

A. N. Yurichev^{a, *}, A. I. Chernyshov^a, and E. V. Korbovyak^a

^aTomsk State University, Tomsk, Russia

*e-mail: juratur@sibmail.com

For the first time, micron-sized platinum group minerals (PGM) have been revealed in dunites and apodunite serpentinites of the Kyzyr-Burluksky ultramafic massif, occurring in the Kurtushibinsky ophiolite belt. Two groups of PGM have been characterized: Os–Ir–Ru and Pt–Pd, with significant predominance of the latter. The leading role of osmium in the composition of metallic solid solutions indicates a significant role of osmium at early stages of the process of ore formation and its mobilization from parent lherzolites. The later sulfides of rare platinum group elements (Ru, Os, Ir) with minor Cu, Ni и Fe, which compositions correspond to MeS, Me₄S₃, and Me₃S₂ were found. It is noted that Pd, together with Hg, are characteristic elements in the ore-forming system of late platinoids with Pt–Pd specialization. The process of the MPG formation included several stages. The earliest assemblage consists of Os–Ir–Ru solid solutions as well as phases Pt₃(Cu,Ni) and (Pt,Os,Re)₃(Ni,Fe,Cu). The rest of PGMs belongs to later assemblages and associates with processes of the mantle-crustal metasomatism, when, under influence of reduced fluids enriched in Hg and S and bearing such elements as Co, Cu, Pd, Au, Ag, Cd, processes of remobilization and redeposition of PGE took place.

Keywords: restitic ultramafites, ophiolites, platinum group minerals (PGM), Western Sayan Mountains, Kizir-Burluksky massif

REFERENCES

Ahmed A.H., Arai S. Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.* 2003. Vol. 41. P. 597–616.

Bezmen N.I., Brugmann G.E., Naldrett A.J. Mechanism of concentration of platinum group elements: partitioning between silicate and sulfide melts. *Int. Geol. Review.* 1991. Vol. 33. N 8. P. 784–792.

- Chernyshov A.I., Yurichev A.N., Kicheeva A.V.* Petrogeochemical characteristics of chrome-bearing ultramafites in the Kurtushibinsky ophiolite belt (Western Sayan). *Lithosphere*. **2019**. Vol. 19. N 5. P. 687–703 (in Russian).
- Chernyshov A.I., Vorobyeva A.V., Yurichev A.N.* Petrology of mafic-ultramafic Kizir-Burluksky massif (northeast of Western Sayan). *Bull. Tomsk Polytechnic University*. **2020**. Vol. 331. N 8. P. 199–207 (in Russian).
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A.* Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geol. Ore Deposits*. **2003**. Vol. 45. N 1. P. 37–65.
- Foley J.Y., Light T.D., Nelson S.W., Harris R.A.* Mineral occurrences associated with mafic-ultramafic and related alkaline complexes in Alaska. In: *Mineral Deposits of Alaska*. Eds. R.A. Goldfarb, M.A. Miller. Economic Geology Monographs 9. **1997**. P. 396–449.
- Garuti G., Zaccarini F.* In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitites of the Vourinos Complex, Greece. *Canad. Miner.* **1997**. Vol. 35. P. 611–626.
- Garuti G., Pushkarev E.V., Zaccarini F.* Compositions and paragenesis of Pt alloys from chromitites of the Ural-Alaskan type Kytlym and Uktus complexes, Northern and Central Urals, Russia. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 357–376.
- Himmelberg G.R., Loney R.* Characteristics and petrogenesis of alaskan-type ultramafic-mafic intrusions, Southeastern Alaska. *U.S. Geol. Surv. Prof. Papers*. **1995**. N 1564. P. 1–43.
- Ivanov O.K.* Concentrically zoned pyroxenite-dunite massifs of the Urals. Yekaterinburg: Ural University, **1997**. 546 p. (in Russian).
- Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Agafonov L.V., Belyanin D.K., Damdinov B.B.* Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoy and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 2. P. 259–272.
- Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Kubyshev A.I., Katanov S.G.* Prospects of chromite-bearing and platinum-bearing of hyperbasites of Upper-Amyl region in the Western Sayan. In: *Mineral resources of Krasnoyarsk region*. Krasnoyarsk, **2002**. P. 314–324 (in Russian).
- Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Agafonov L.V.* Ore mineralization of hyperbasites of Ergaksky massif and prospects for its chromite-bearing. In: *Conditions and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Geo-ecology of natural environment and society*. Vol. 8. Kyzyl, **2005**. P. 32–44 (in Russian).
- Malich K.N., Badanina I.Yu., Knauf V.V., Meisel T.* Mineralogical-geochemical associations of platinumoids of dunite-garzburite and clinopyroxenite-dunite massifs. *Proc. Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch RAS*. **2013**. Vol. 160. P. 255–260 (in Russian).
- Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpfl E.F.* Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *J. Petrol.* **1997**. Vol. 38. P. 1419–1458.
- Podlipsky M.Yu., Krivenko A.P.* Platinum-chromite mineralization in ophiolite hyperbasites of the Western Sayan. In: *Platinum of Russia. New unconventional types of deposits and ore occurrences of platinum-containing raw materials*. **2005**. Vol. 6. P. 100–109 (in Russian).
- Pushkarev E.V., Anikina E.V., Garuti J., Zaccarini F.* Chromium-platinum deposits of nizhny-tagil type in the Urals: structural-substantial characteristic and a problem of genesis. *Lithosphere*. **2007**. N 3. P. 28–65 (in Russian).
- Sidorov E.G., Kozlov A.P., Tolstykh N.D.* Galmoechnan basite-hyperbasite massif and its platinum content. Moscow: Scientific world, **2012**. 288 p. (in Russian).
- Smirnova T.A.* Telluric iron in ultramafic rocks of Kempirsai pluton. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1970**. Vol. 99. N 6. P. 745–748 (in Russian).
- Sobolev V.S., Dobretsov N.L.* Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (a case study of the Polar Urals and Western Sayan). Novosibirsk: Nauka, **1977**. 222 p. (in Russian).
- Talhammer T.V.* Association of minerals of platinum group in massive chromite ores of Kempirsai ophiolite complex (Southern Urals) as manifestation of mantle metasomatism. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. Vol. 125. N 1. P. 25–36 (in Russian).
- Workman R.K., Hart S.R.* Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth Planet. Sci.* **2005**. Vol. 231. P. 53–72.
- Yurichev A.N.* Accessory sulphides from chromitites of Kharcheruz ultramafic massif, the Polar Urals. *Ores and metals*. **2020**. N 4. P. 54–64 (in Russian).
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I.* Platinum-bearing of chromitites from the Kurtushibinsky ophiolite belt, Western Sayan: new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. N 5. P. 113–125 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2020**. Vol. 62. N 8. P. 787–795).
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V.* Platinum group minerals from chromitites of Kempirsai ultramafic massif (the South Urals, Kazakhstan): new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. Vol. 148. N 2. P. 76–86 (in Russian).
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V.* Platinum-bearing of chromitites in the Kharcheruz ultramafic massif (the Polar Urals): new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 3. P. 38–53 (in Russian).
- Zhou M-F., Robinson P., Malpas J., Li Z.* Podiform chromites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *J. Petrol.* **1996**. Vol. 37. P. 3–21.