

ХРОМИТ-ПЛАТИНОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КЛИНОПИРОКСЕНИТ-ДУНИТОВОГО МАССИВА ЖЁЛТАЯ СОПКА, СЕВЕРНЫЙ УРАЛ**И.А. Кузьмин¹, Р.С. Паламарчук¹, В.М. Калугин², А.В. Козлов¹, Д.А. Варламов³**¹ Санкт-Петербургский горный университет, 21 линия ВО 2, г. Санкт-Петербург, 1991096 Россия;
kuzmin.kuvanechka@yandex.ru² Институт геологии и минералогии СО РАН, пр. Академика Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090 Россия³ Институт экспериментальной минералогии РАН, ул. Академика Осипяна 4, г. Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия**CHROMITE-PLATINUM MINERALIZATION OF CLINOPYROXENITE-DUNITE MASSIF ZHELTAYA SOPKA, NORTH URAL****I.A. Kuzmin¹, R.S. Palamarchuk¹, V.M. Kalugin², A.V. Kozlov¹, D.A. Varlamov³**¹ Saint-Petersburg Mining University, 21 liniya VO 2, St. Petersburg, 1991096 Russia;
kuzmin.kuvanechka@yandex.ru² Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptiuga 3, Novosibirsk, 630090 Russia³ Institute of Experimental Mineralogy RAS, ul. Akademika Osip'yana 4, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia

Аннотация. В статье впервые приведены результаты комплексного исследования ассоциации минералов платиновой группы (МПП) в дунитах и хромититах клинопироксенит-дунитового массива Жёлтая Сопка на Северном Урале. Специфической особенностью этого массива является небольшое количество тел хромититов, что в совокупности с особенностями составов хромшпинелидов указывает на слабое проявление процессов рудообразования в массиве. Впервые в пределах Платиноносного Пояса Урала (ППУ) обнаружены минералы минакавит и чендеит. Проведен сравнительный анализ особенностей ассоциаций МПП Жёлтой Сопки с Иовским, Юдинским и Сосновским дунитовыми телами, входящими в северную часть ППУ. В результате установлена идентичность ассоциаций МПП при преобладании в дунитах Жёлтой Сопки минералов наложенного парагенезиса. Состав хромшпинелидов характеризуется отсутствием хромит-магнетитового тренда и выделяется существенно повышенными содержаниями Cr_2O_3 и Al_2O_3 по сравнению с другими массивами ППУ.

Ключевые слова: Платиноносный Пояс Урала, Жёлтая Сопка, минакавит, чендеит, хромшпинелиды, минералы платиновой группы.

Abstract. The paper presents the new data on platinum group minerals (PGM) and chromite from the Zheltaya Sopka massif, North Urals. Few chromite bodies along with specific composition of chromite indicate weak ore-forming processes developed in this massif. Minakawaite (RhSb) and chengdeite (Ir_3Fe) are found for the first time in the Uralian Platinum Belt. The PGM assemblage of the Zheltaya Sopka massif is compared with that of the Iov, Yuda, and Sosnovsky dunite massifs of the northern part of the Uralian Platinum Belt. As a result, similar PGM assemblages with dominant minerals of late assemblages are established in dunites of the Zheltaya Sopka massif. Chromites of the massif show no evident chromite-magnetite trend typical of clinopyroxenite-dunite massifs of the Urals and are relatively enriched in Cr_2O_3 and Al_2O_3 in comparison with chromite of other UPB massifs.

Key words: Uralian Platinum Belt, Zheltaya Sopka, minakawaite, chengdeite, chromites, platinum group minerals.

Введение

Платиноносный Пояс Урала (ППУ) включает в себя ряд зональных клинопироксенит-дунитовых массивов, с большинством из которых (Вересовоборский, Светлоборский, Нижнетагильский и др.) связаны промышленные платиновые россыпи. Самым северным из массивов, с которыми связаны промышленные платиновые россыпи, является массив Жёлтая Сопка. За время эксплуатации связанных с ним россыпей, полностью отработанных к настоящему времени, было извлечено около 4 т Pt (Мосин, 2000). Несмотря на давно установленную взаимосвязь платиновых россыпей с зонами хромитовой минерализации в дунитах зональных массивов (Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935; Лазаренков и др., 1992), коренное хромит-платиновое оруденение Жёлтой Сопки изучено крайне слабо. Скорее всего, это связано с тем, что по сравнению с другими клинопироксенит-дунитовыми массивами Урала массив Жёлтая Сопка содержит мало хромититовых тел.

Целью работы является характеристика коренной хромит-платиновой минерализации массива Жёлтая Сопка. Для этого изучены морфологические особенности и определен состав отдельных минеральных индивидов и сегрегаций хромшпинелидов, проанализирован состав, морфологические особенности и взаимоотношения различных индивидов и агрегатов минералов платиновой группы (МППГ). Полученные результаты сопоставлены с ассоциациями МППГ в наиболее изученных платиноносных клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего и Северного Урала.

Методика исследований

В ходе экспедиционных работ летом 2018 г., проведенных по согласованию с администрацией государственного геологического заповедника Денежкин Камень, в западной части массива Жёлтая Сопка (рис. 1а) были отобраны пробы прожилково-вкрапленных хромититов весом 50–70 кг. Они были частично раздроблены до крупности менее 1 мм и обогащены методом последовательного гравитационного концентрирования с дальнейшим выделением зерен МППГ методом «отдувки». Зерна хромшпинелидов и МППГ были вмонтированы в шашки из эпоксидной смолы. Из оставшихся хромититов были изготовлены аншлифы. Микроскопические исследования препаратов проведены на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding),

оборудованном системой микроанализа IncaEnergy 450+ X-Max 80 (Oxford Instruments Nano Analysis) при ускоряющем напряжении 20 кВ и живом времени набора спектров 20 с (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, аналитик М.В. Хлестов), CamScan MV2300 с детектором INCA Energy 350 (Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, аналитик Д.А. Варламов) и VEGA 3 со спектрометром ЭДС X-MAX (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, аналитик В.М. Чубаров). Формулы хромшпинелидов рассчитывались на четыре атома кислорода. Формулы Pt-Fe интерметаллидов и Os-Ir-Ru интерметаллидов, а также минералов Ir-Fe состава рассчитывались на сумму металлов. Формулы сульфидов и сульфосолей ЭПГ рассчитывались на количество анионов серы и сумму As + S, соответственно.

Краткая геологическая характеристика массива Жёлтая Сопка

Массив Жёлтая Сопка является составной частью полифазного интрузивного комплекса Денежкин Камень, расположенного в 25 км к северо-западу от г. Североуральска. Согласно государственной геологической карте массив сложен ультрамафитами и мафитами качканарского комплекса, габбро-норитами тагило-кытлымского комплекса, а также гранодиоритами волковского комплекса (Петров и др., 2008). В составе массива преобладают дуниты первой фазы качканарского комплекса, которые образуют ядро 5.5×2 км, обрамленное клинопироксенит-верлитовой оторочкой шириной до 800 м (Иванов, 1997). Структуры дунитов меняются от тонкозернистых до крупнозернистых и даже до пегматоидных ближе к центральным частям дунитового ядра (рис. 1б). Отмечаются повышенные содержания Pt в порфировидных разновидностях в зонах фациального перехода от мелкозернистых к крупнозернистым дунитам и существенно пониженные концентрации – в пегматоидных дунитах (Кузьмин и др., 2020). Закономерность между пространственным расположением хромититовых шпиров и содержанием в них зерен МППГ не наблюдается.

Морфологические особенности и состав хромшпинелидов массива Жёлтая Сопка

В дунитах массива Жёлтая Сопка, как и в других клинопироксенит-дунитовых массивах, ши-

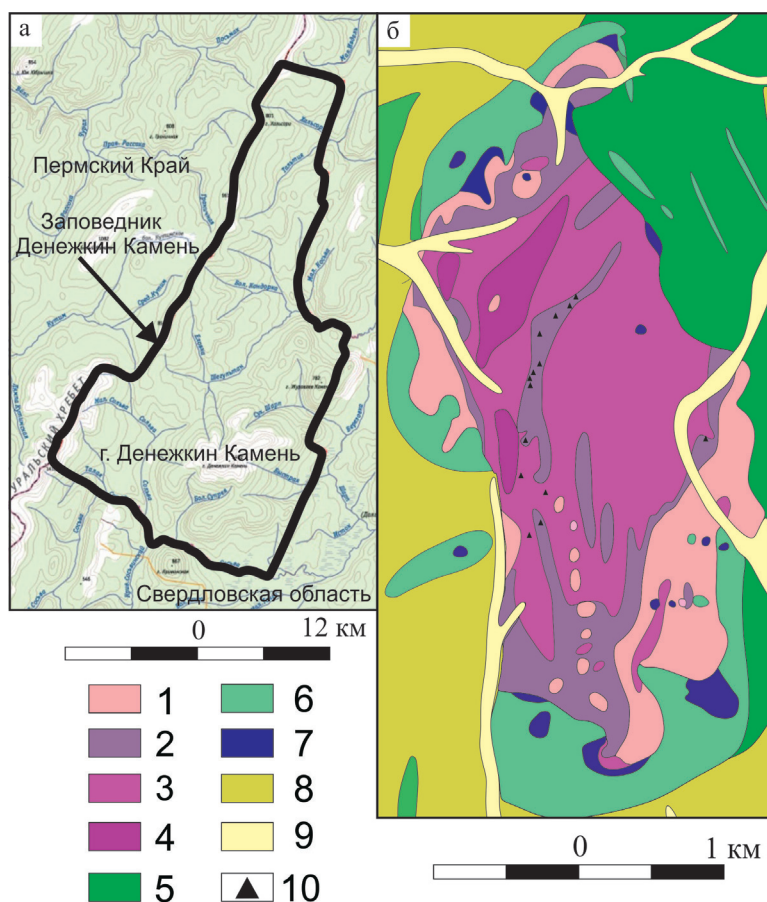


Рис. 1. Географическая позиция массива Жёлтая Сопка (а) и геологическая схема его западной части по (Иванов, 1997) с дополнениями (б).

1–4 – дуниты: 1 – тонкозернистые, 2 – мелкозернистые, 3 – среднезернистые, 4 – гигантозернистые; 5 – габбро; 6 – клинопироксениты; 7 – верлиты; 8 – вмещающие породы амфиболиты; 9 – аллювиальные отложения; 10 – места обнаружения хромититовых шлиров.

Fig. 1. Geographical position of Zheltaya Sopka massif (a) and geological map of its western part, modified after (Ivanov, 1997) (б).

1–4 – dunite: 1 – fine-grained, 2 – small-grained, 3 – medium-grained, 4 – giant-grained; 5 – gabbro; 6 – clinopyroxenite; 7 – wehrilite; 8 – host amphibolite; 9 – alluvial sediments; 10 – places of finding of chromite schlieren.

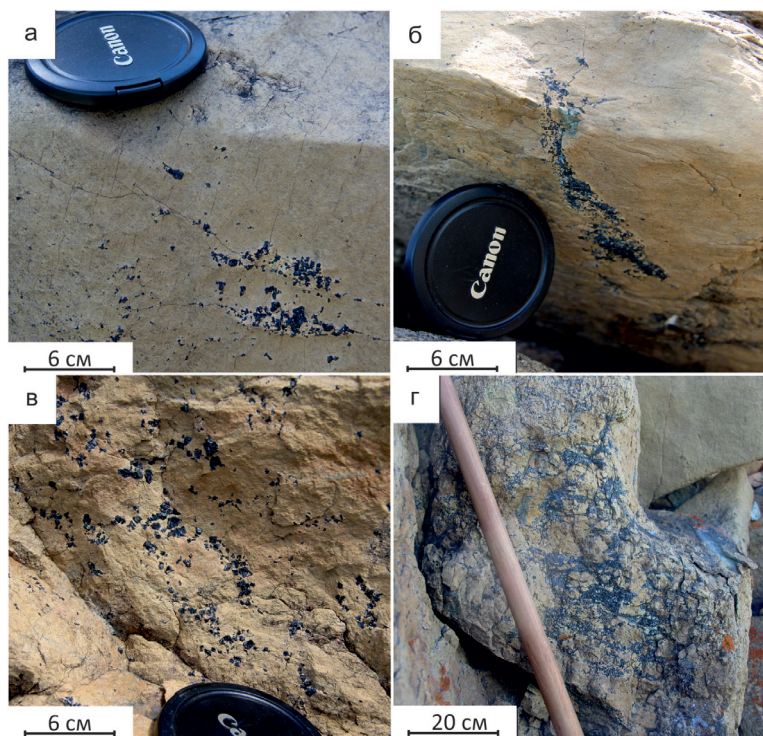


Рис. 2. Сегрегации хромшпинелидов в дунитах массива Жёлтая Сопка: а, б, в – прожилково-вкрапленный хромшпинелид; г – хромитовая сегрегация.

Fig. 2. Chromite segregations in dunites of the Zheltaya Sopka massif: а, б, в – stringer-disseminated chromite; г – chromite segregation.

Рис. 3. Состав хромшпинелидов массива Жёлтая Сопка на классификационной диаграмме Al-Fe-Cr.

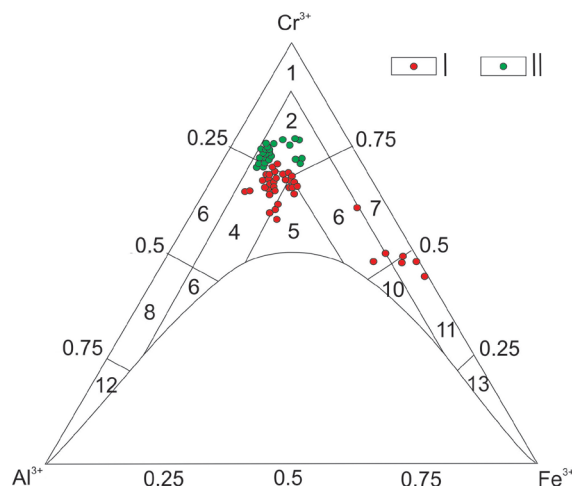
I – акцессорный хромшпинелид; II – хромшпинелид из прожилково-вкрапленных хромитов. Цифрами на диаграммах отмечены поля составов: 1 – хромит; 2 – субферрихромит; 3 – алюмохромит; 4 – субферриалюмохромит; 5 – ферриалюмохромит; 6 – субалюмоферрихромит; 7 – феррихромит; 8 – хромпикотит; 9 – субферрихромпикотит; 10 – субалюмохроммагнетит; 11 – хроммагнетит; 12 – пикотит; 13 – магнетит.

Fig. 3. Composition of chromite of the Zheltaya Sopka massif on Al-Fe-Cr diagram.

I – accessory chromite; II – chromite from vein-disseminated chromitites. Compositional fields of: 1 – chromite; 2 – subferrichromite; 3 – alumochromite; 4 – subferrialumochromite; 5 – ferrialumochromite; 6 – subalumoferrichromite; 7 – ferrichromite; 8 – chrompicotite; 9 – subferrichrompicotite; 10 – subalumochromite; 11 – chrommagnetite; 12 – picotite; 13 – magnetite.

роко распространен акцессорный хромшпинелид, содержание которого находится в пределах первых процентов. Он образует изометричные зерна, часто в виде идиоморфных октаэдрических кристаллов, которые отчетливо выделяются на поверхности выветривания дунитов. Существенно реже встречаются компактные скопления хромшпинелидов. Они представлены небольшими прожилково-вкрапленными сегрегациями (рис. 2а–в) либо шпировыми скоплениями с максимальным размером до полуметра (рис. 2г).

По химическому составу большинство хромшпинелидов по классификации (Павлов и др., 1979) соответствует субферрихромиту и субферриалюмохромиту (рис. 3). Реже встречаются кристаллы ферриалюмохромита и совсем редко – зерна хромшпинелидов, периферические зоны которых обогащены Fe и по составу приближаются к субалюмоферрихромиту, феррихромиту и хроммагнетиту. Акцессорные хромшпинелиды массива Жёлтая Сопка отличаются от хромшпинелидов из прожилково-вкрапленных хромитов повышенным содержанием Cr, что отмечалось ранее и для других массивов ППУ (Степанов и др., 2018а, б). Особенностью хромшпинелидов Жёлтой Сопки по сравнению с хромшпинелидами Каменушенского, Светлоборского и Вересовоборского массивов является полное отсутствие в их составе Mn и Ni (табл. 1).



Морфологические особенности и состав минералов платиновой группы

Практически все обнаруженные зерна МПГ являются Pt-Fe интерметаллидами. Среди них по общепринятой номенклатуре (Harris, Cabri, 1991; Cabri, 2002) преобладает изоферроплатина, обычно образующая изометрические зерна размером до 100 мкм или иногда формирующая идиоморфные кристаллы кубического габитуса с длиной ребра около 20–30 мкм. Существенно реже встречается железистая платина, также образующая идиоморфные кристаллы (рис. 4а, б).

Подавляющее большинство первичных Pt-Fe интерметаллидов замещается минералами, близкими по составу к туламиниту. Этот минерал образует каймы замещения толщиной от первых микрометров до 20–30 мкм и более (рис. 4г), реже встречаются почти полные псевдоморфозы туламинита по изоферроплатине и крайне редко встречаются первичные Pt-Fe интерметаллиды, полностью замещенные тетраферроплатиной.

В первичных Pt-Fe интерметаллидах относительно часто встречаются включения Os-Ir-Ru состава. Они образуют небольшие пластинчатые индивиды в железистой платине (рис. 4а), а их поперечные сечения длиной до 100 мкм (рис. 4д) можно повсеместно наблюдать в изоферроплатине. Единственное крупное изометрическое зерно, сложенное минералами Os-Ir-(Ru) состава, характеризуется срастанием пластинок самородного осмия и изометричных обособлений самородного иридия, в свою очередь, срастающегося с зональным идиоморфным

Состав хромшпинелидов массива Жёлтая Сопка (мас. %)

Таблица 1

Composition of chromites of the Zheltaya Sopka massif (wt. %)

Table 1

№ п/п	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO _{общ}	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	5.51	2.87	—	56.29	35.37	100.04	(Fe _{0.71} Mg _{0.29}) _{1.00} (Cr _{1.56} Fe _{0.32} Al _{0.12}) _{2.00} O _{4.00}
2	6.68	6.79	0.16	39.61	47.23	100.47	(Fe _{0.65} Mg _{0.34} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.06} Fe _{0.67} Al _{0.27}) _{2.00} O _{4.00}
3	8.49	9.80	—	55.10	26.78	100.17	(Fe _{0.58} Mg _{0.42}) _{1.00} (Cr _{1.45} Fe _{0.17} Al _{0.38}) _{2.00} O _{4.00}
4	8.54	9.78	0.19	55.55	27.85	101.91	(Fe _{0.58} Mg _{0.41} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.44} Fe _{0.19} Al _{0.38}) _{2.00} O _{4.00}
5	9.98	9.61	0.24	55.20	24.18	99.21	(Fe _{0.50} Mg _{0.49} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.45} Fe _{0.18} Al _{0.37}) _{2.00} O _{4.00}
6	10.39	10.14	0.29	57.66	25.16	103.64	(Fe _{0.50} Mg _{0.50}) _{1.00} (Cr _{1.45} Fe _{0.17} Al _{0.38}) _{2.00} O _{4.00}
7	10.60	9.43	0.41	56.02	24.33	100.79	(Fe _{0.47} Mg _{0.52} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.45} Fe _{0.19} Al _{0.36}) _{2.00} O _{4.00}
8	11.51	9.69	0.38	57.00	22.86	101.44	(Fe _{0.43} Mg _{0.56} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.45} Fe _{0.18} Al _{0.37}) _{2.00} O _{4.00}
9	11.91	9.30	0.38	56.96	21.54	100.09	(Fe _{0.41} Mg _{0.58} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.47} Fe _{0.18} Al _{0.36}) _{2.00} O _{4.00}
10	11.94	9.79	0.37	58.48	21.71	102.29	(Fe _{0.42} Mg _{0.57} Ti _{0.01}) _{1.00} (Cr _{1.47} Fe _{0.16} Al _{0.47}) _{2.00} O _{4.00}

Примечание. СЭМ VEGA 3 (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, аналитик В.М. Чубаров). Здесь и далее, прочерк – не определено.

Note. SEM VEGA (Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, analyst V.M. Chubarov). Hereinafter, dash – not determined.

кристаллом лаурита (рис. 4е). В виде сростаний с первичными Pt-Fe интерметаллидами и минералами Os-Ir-(Ru) отмечаются единичные зерна сульфидов ЭПГ. Среди них преобладает лаурит, образующий изометрические кристаллы (рис. 4е), а также сложные зональные сростания лаурита с эрликманитом и ирарситом на границе с изоферроплатиной (рис. 4ж). По границам первичных Pt-Fe интерметаллидов широко распространены минералы наиболее позднего парагенезиса: например, чендеит в виде удлиненных кристаллов с элементами огранки (рис. 4з) или тонкие прожилки на границе с меркуридами ЭПГ сложного строения. В таких зонах часто встречаются включения сульфидов, арсенидов и антимонидов ЭПГ (рис. 4к–м), в том числе – минакавайта, образующего зерна размером до 20 мкм, а также идиоморфные кристаллы с ромбическим сечением в туламините размером около 10 мкм (рис. 4к).

Состав первичных Pt-Fe интерметаллидов варьирует от преобладающей изоферроплатины (Pt₃Fe), содержащей незначительные примеси Cu, Rh и Ir (до 2 мас. %), до железистой платины (Pt₂Fe) (рис. 5). Железистая платина почти не содержит примесей.

Практически все первичные Pt-Fe интерметаллиды частично или полностью замещаются минералами ряда тетраферроплатина (PtFe) – туламинит (Pt₂FeCu). Состав минералов этой группы изменяется от тетраферроплатины до туламинита

(табл. 2, ан. 10–12), и далее к никельферроплатине с содержанием Ni до 7 мас. % (рис. 5б и табл. 2, ан. 9).

Состав минералов Os-Ir-Ru, образующих включения в Pt-Fe интерметаллидах, варьирует от практически чистого осмия до осмия с 37.7 мас. % Ir (табл. 3, рис. 6). Содержание Ru в таких зернах обычно не превышает 7 мас. %, в редких случаях достигая 22 мас. % на границах с зернами лаурита (рис. 4е). В сложных минеральных сростаниях наблюдается отчетливое разделение минералов этой группы на самородный осмий и минерал, близкий по составу к самородному иридию (рис. 4е).

В ранний парагенезис входят и сульфиды ЭПГ, среди которых преобладает лаурит. Он образует как гомогенные зерна с выдержанным составом так и сложные сростания с минералами изоморфного ряда ирарсит (IrAsS) – холлингуортит (RhAsS).

Лаурит характеризуется разным содержанием эрликманитового минала (от первых до 20 и более ат. %). Для таких сростаний характерны примеси As до 1.6 ат. %. Помимо лаурита-эрликманита отмечаются различные сульфоарсениды ЭПГ (табл. 4).

По первичным Pt-Fe интерметаллидам образуются минералы наиболее позднего парагенезиса. Помимо уже рассмотренных тетраферроплатины, туламинита и ферроникельплатины в значимых количествах обнаруживаются соединения Ir, Rh и Pt с железом в различных соотношениях (табл. 5), в том числе близкие по составу к чендеиту (Ir₃Fe).

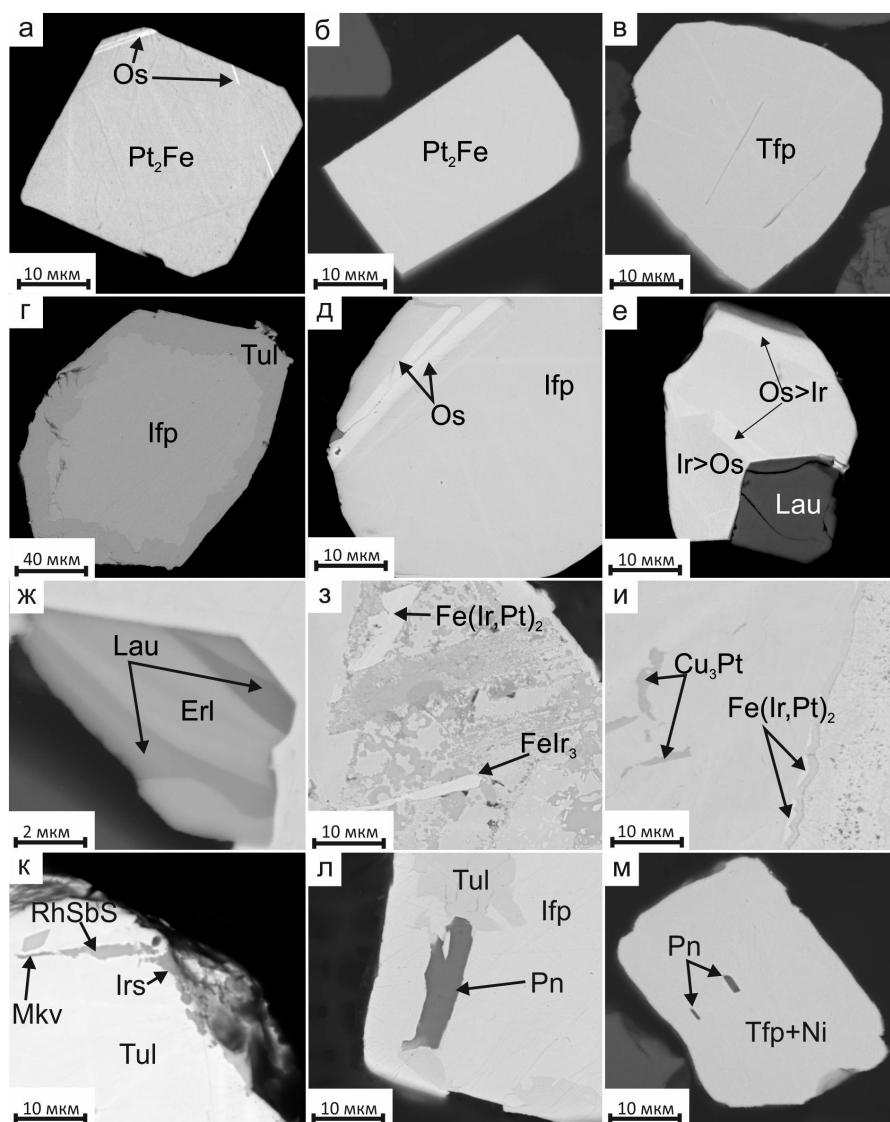


Рис. 4. Морфологические особенности и внутреннее строение индивидов и агрегатов МПГ:

а, б – кристаллы железистой платины; в – зерно туламинита; г – изоферроплатина, замещающаяся туламинином; д – включения самородного осмия в изоферроплатине; е – Os-Ir интерметаллиды в ассоциации с лауритом; ж – зональное зерно лаурита-эрликманита в ассоциации с ирарситом; з – кристаллы чендеита в туламините; и – включения Cu_3Pt и Ir-Fe интерметаллидов в туламините; к – минакаваит в ассоциации с холлингуортитом в туламините; л – включение пентландита в изоферроплатине; м – включение пентландита в матрице никельсодержащей тетраферроплатины.

Здесь и на рис. 7, Ifp – изоферроплатина, Tfp – тетраферроплатина, Tul – туламинит, Os – осмий, Ir – иридий, Lau – лаурит, Erl – эрликманит, Irs – ирарсит, Mkv – минакаваит, Pn – пентландит, RhSbS, Pt_2Fe , $\text{Fe}(\text{Ir},\text{Pt})_2$, Cu_3Pt , – не названные фазы.

Fig. 4. Morphological features and internal structure of the PGM grains:

а, б – Pt_2Fe crystals; в – tulameenite grain; г – isoferroplatinum replaced by tulameenite; д – inclusion of osmium in isoferroplatinum; е – Os-Ir alloys associated with laurite; ж – zoned laurite-erlichmanite grain associated with irarsite; з – chengdeite crystals in tulameenite; и – inclusions of Cu_3Pt and Ir-Fe alloys in tulameenite; к – minakawaite with hollingworthite in tulameenite; л – inclusion of pentlandite in isoferroplatinum; м – inclusions of pentlandite in Ni-bearing tetraferroplatinum.

Here and in Fig. 7, Ifp – isoferroplatinum, Tfp – tetraferroplatinum, Tul – tulameenite, Os – osmium, Ir – iridium, Lau – laurite, Erl – erlichmanite, Irs – irarsite, Mkv – minakawaite, Pn – pentlandite; RhSbS, Pt_2Fe , $\text{Fe}(\text{Ir},\text{Pt})_2$, Cu_3Pt , RhAsS – unnamed minerals.

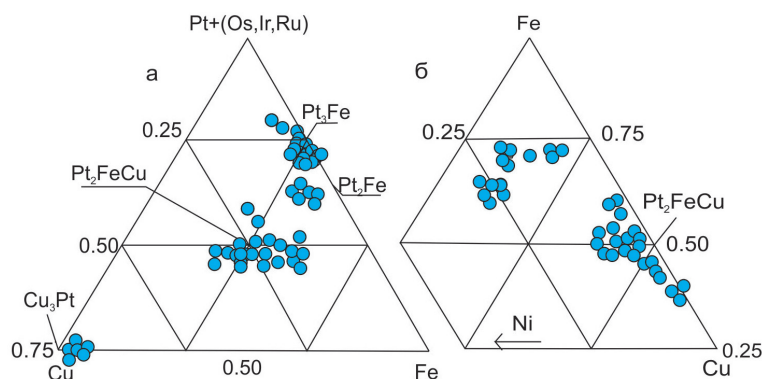


Рис. 5. Состав Pt-Fe интерметаллидов из прожилково-вкрапленных хромитов массива Жёлтая Сопка.

Fig. 5. Composition of Pt-Fe alloys from stringer-disseminated chromites of the Zheltaya Sopka massif.

Состав Pt-Fe интерметаллидов (мас. %)

Таблица 2

Composition of Pt-Fe alloys (wt. %)

Table 2

№ п/п	Fe	Ni	Cu	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Сумма	Кристаллохимическая формула
Железистая платина										
1	10.81	1.72	0.71	—	—	—	—	84.84	98.09	$Pt_{0.65}Fe_{0.27}Ni_{0.05}Cu_{0.03}$
2	10.56	1.97	0.82	—	0.49	0.65	—	85.35	99.84	$Pt_{0.64}Fe_{0.3}Ni_{0.04}Cu_{0.02}$
Изоферроплатина										
3	9.34	—	0.18	0.10	0.62	0.50	2.25	88.15	101.14	$(Pt_{2.80}Ir_{0.07}Rh_{0.03}Pd_{0.03}Ru_{0.01})_{2.94}(Fe_{1.04}Cu_{0.02})_{1.06}$
4	9.55	0.06	0.43	0.21	0.80	0.20	2.37	87.13	100.75	$(Pt_{2.75}Ir_{0.08}Rh_{0.05}Pd_{0.01}Ru_{0.02})_{2.91}(Fe_{1.03}Cu_{0.08})_{1.11}$
5	9.90	0.30	0.02	—	—	1.83	0.61	87.63	100.29	$(Pt_{2.75}Pd_{0.11}Ir_{0.02}Rh_{0.02}Fe_{1.09})_{1.12}$
6	9.81	0.04	0.16	—	—	1.19	—	87.91	99.11	$(Pt_{2.8}Pd_{0.09}Ir_{2.89}Fe_{1.09}Cu_{0.02})_{1.11}$
7	9.43	—	0.31	—	0.98	0.06	—	87.22	100.76	$(Pt_{2.76}Ir_{0.09}Rh_{0.05}Pd_{0.02}Ru_{0.01})_{2.87}(Fe_{1.1}Ni_{0.02}Cu_{0.01})_{1.13}$
8	10.22	0.30	0.14	0.26	0.58	0.32	1.24	86.69	99.86	$(Pt_{2.79}Ir_{0.03}Rh_{0.02}Pd_{0.01}Ru_{0.02})_{2.87}(Fe_{1.1}Ni_{0.02}Cu_{0.01})_{1.13}$
Ферроникельплатина										
9	14.09	6.1	3.04	—	—	—	—	76.9	100.10	$Pt_{1.96}Fe_{1.28}(Cu_{0.24}Ni_{0.52})_{0.76}$
Туламинит										
10	10.50	0.08	13.44	—	0.14	—	1.45	73.98	99.59	$(Pt_{1.94}Rh_{0.01}Ir_{0.01})_{1.96}Fe_{0.96}(Cu_{1.07}Ni_{0.01})_{1.08}$
11	8.87	0.28	14.53	—	—	0.33	2.12	73.67	99.80	$(Pt_{1.92}Ir_{0.06}Pd_{0.02}Fe_{0.81})_{1.17}(Cu_{1.17}Ni_{0.02})_{1.19}$
12	11.38	1.18	11.90	0.50	—	—	0.49	72.72	98.17	$(Pt_{1.88}Ru_{0.03}Ir_{0.02})_{1.93}Fe_{1.03}(Cu_{0.94}Ni_{0.10})_{1.04}$
Неназванный Pt-Fe интерметаллид										
13	12.82	5.90	5.36	0.41	0.14	—	0.68	74.17	99.48	$(Pt_{1.89}Ru_{0.02}Ir_{0.01}Rh_{0.01})_{1.93}Fe_{1.15}(Ni_{0.5}Cu_{0.42})_{0.92}$
14	12.79	4.42	6.73	—	0.20	0.39	2.29	72.04	98.86	$(Pt_{1.85}Ir_{0.06}Pd_{0.02})_{1.93}Fe_{1.15}(Cu_{0.53}Ni_{0.38})_{0.92}$

Примечание. Здесь и в таблицах 3–5, анализы получены на приборе MIRA 3 LMU (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, аналитик М.В. Хлестов) и заверены на приборе CamScan MV2300 (Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черногоровка, аналитик Д.А. Варламов).

Note. Here and in Tables 3–5, the analyses were carried out on a MIRA 3 LMU SEM (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, analyst M.V. Khlestov) and verified on a SEM CamScan MV2300 (Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka, analyst D.A. Varlamov).

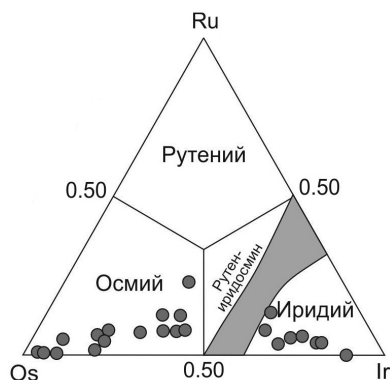


Рис. 6. Состав Os-Ir-Ru интерметаллидов из прожилково-вкрапленных хромитов массива Жёлтая Сопка.

Fig. 6. Composition of Os-Ir-Ru alloys from stringer-disseminated chromites of the Zheltaya Sopka massif.

Таблица 3

Состав Os-Ir интерметаллидов (мас. %)

Table 3

Composition of Os-Ir alloys (wt. %)

№ п/п	Ru	Rh	Os	Ir	Сумма	Кристаллохимическая формула
Иридий-осмий						
1	2.67	0.91	77.62	17.64	98.84	$\text{Os}_{0.76}\text{Ir}_{0.17}\text{Ru}_{0.05}\text{Rh}_{0.02}$
2	2.89	—	76.36	18.95	98.20	$\text{Os}_{0.76}\text{Ir}_{0.19}\text{Ru}_{0.05}$
3	3.61	0.64	73.75	20.62	98.62	$\text{Os}_{0.72}\text{Ir}_{0.2}\text{Ru}_{0.07}\text{Rh}_{0.01}$
Иридоосмий						
4	5.38	0.92	55.87	37.70	99.87	$\text{Os}_{0.53}\text{Ir}_{0.36}\text{Ru}_{0.1}\text{Rh}_{0.01}$
Осмий						
5	2.04	—	87.83	8.9	98.77	$\text{Os}_{0.87}\text{Ir}_{0.09}\text{Ru}_{0.04}$

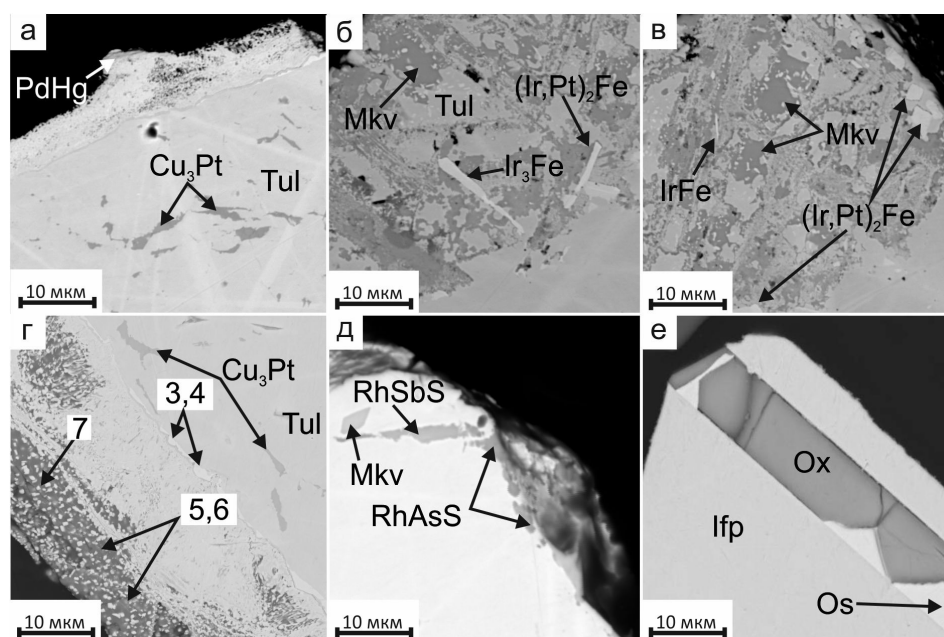


Рис. 7. Наиболее поздняя минеральная ассоциация МПГ:

а – включения Cu_3Pt в туламините с каймой потарита; б, в – кристаллы чендеита в туламините в ассоциации с минакаваитом; г – прожилки Ir-Fe интерметаллидов в туламините; д – минакаваит в ассоциации с холлингуортитом; е – оксид Ir в ассоциации с изоферроплатиной.

Ir_3Fe – чендеит, PdHg – потарит, RhAsS – холлингуортит, Ox – оксид иридия. Цифры соответствуют номерам анализов в табл. 5.

Fig. 7. The latest PGM mineral assemblage:

а – Cu_3Pt inclusions in tulameenite with potarite; б, в – chendeite crystals in tulameenite with minakawaite; г – inclusions of Ir-Fe alloys in tulameenite; д – minakawaite with hollingworthite; е – Ir oxide in isoferroplatinum.

Ir_3Fe – chendeite, PdHg – potarite, RhAsS – hollingworthite, Ox – Ir oxide. The numbers correspond to numbers of analyses in Table 5.

В ассоциации с этими минералами повсеместно встречается минакаваит (RhSb) (рис. 7б, в), все составы которого характеризуются выдержанным соотношением главных компонентов при концентрации остальных ЭПГ ниже предела обнаружения (табл. 4). Он встречается как в виде ксеноморфных зерен и зерен с ромбическими сечениями размером более 10 мкм. Чендеит обнаружен в каймах замещения, его зерна достигают 10 мкм и частично со-

храняют свою огранку. В ходе исследований была обнаружена минеральная фаза промежуточного состава между IrFe и Ir_3Fe (рис. 8). В ассоциации с кристаллами Ir-Fe интерметаллидов обнаружены зерна, по составам отвечающие минералам изоморфного ряда ирарсит (IrAsS) – холлингуортит (RhAsS) и находящимся в ассоциации с удлиненными кристаллами железистого иридия и в сложных сростаниях с лауридом (рис. 4ж). Содержание

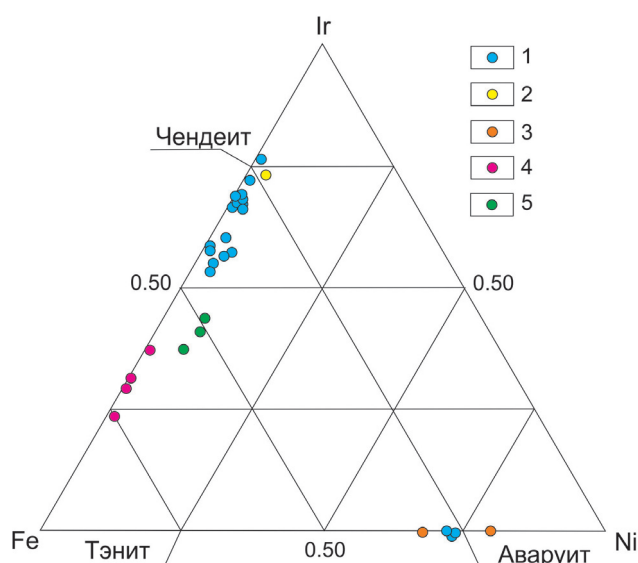


Рис. 8. Состав Ir-Fe-Ni интерметаллидов из различных ультрамафитовых массивов на диаграмме (Cabri, Aiglsperger, 2018) с авторскими дополнениями.

1 – Массив Жёлтая Сопка (авторские данные); 2 – Бор-Уряхский массив (Malitch, Kogarko, 2011); 3 – река Джерри (Challis, 1975); 4 – Лома Ля Пегера и Лома Ляржа (Мочалов и др., 1998); 5 – Лома Ля Пегера (McDonald et al., 2010).

Fig. 8. Composition of Ir-Fe-Ni alloys from various ultramafic massifs on diagram, modified after (Cabri, Aiglsperger, 2018).

1 – Zheltaya Sopka massif (original data); 2 – Bor-Uryakh massif (Malitch, Kogarko, 2011); 3 – Jerry River (Challis, 1975); 4 – Loma la Pegera and Loma la Larga (Mochalov et al., 1998); 5 – Loma la Pegera (McDonald et al., 2010).

Таблица 4

Состав сульфидов, сульфосаренидов и сульфосантимонидов ЭПГ (мас. %)

Table 4

Composition of sulfides, sulfoarsenides and sulfoantimonides PGE (wt. %)

№	S	As	Ru	Rh	Pd	Sb	Os	Ir	Pt	Сумма	Кристаллохимическая формула
Лаурит-эрликманит											
1	33.03	0.43	33.28	1.25	0.34	–	26.20	4.58	–	98.77	$(\text{Ru}_{0.61}\text{Os}_{0.4}\text{Ir}_{0.04}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.001})_{0.97}(\text{S}_{1.98}\text{As}_{0.02})_2$
Незванный сульфосантимонид Rh, Pt и Ir											
2	10.95	1.66	–	33.92	–	40.50	–	4.56	7.09	98.68	$(\text{Rh}_{0.80}\text{Pt}_{0.09}\text{Ir}_{0.06})_{0.95}(\text{Sb}_{0.96}\text{S}_{0.98}\text{As}_{0.06})_2$
Холлингвортит											
3	13.29	33.24	–	40.27	–	1.77	–	2.21	9.95	100.73	$(\text{Rh}_{0.86}\text{Pt}_{0.12}\text{Ir}_{0.03})_{1.01}(\text{As}_{1.02}\text{S}_{0.95}\text{Sb}_{0.03})_2$
Минакаваит											
4	–	0.11	–	42.49	0.38	53.14	–	0.03	3.82	99.97	$(\text{Rh}_{0.94}\text{Pt}_{0.04}\text{Pd}_{0.004}\text{Ir}_{0.001})_{0.985}(\text{Sb}_{0.99}\text{As}_{0.01})_1$
5	0.05	0.29	–	42.3	–	52.77	0.11	–	3.96	99.48	$(\text{Rh}_{0.94}\text{Pt}_{0.04}\text{Os}_{0.001})_{0.99}(\text{Sb}_{0.99}\text{As}_{0.005}\text{S}_{0.005})_1$

Таблица 5

Состав минералов поздней ассоциации (мас. %)

Table 5

Composition of minerals of late mineral assemblage (wt. %)

№	Fe	Cu	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Hg	Сумма	Кристаллохимическая формула
Чендеит											
1	6.99	1.26	0.30	0.72	–	1.33	76.00	14.23	–	100.83	$(\text{Ir}_{2.52}\text{Pt}_{0.46}\text{Os}_{0.04}\text{Rh}_{0.04}\text{Ru}_{0.02})_{3.08}(\text{Fe}_{0.79}\text{Cu}_{0.13})_{0.92}$
Незванный минерал											
2	21.88	1.03	0.15	41.30	–	–	28.69	6.45	–	99.50	$(\text{Rh}_{0.81}\text{Ir}_{0.3}\text{Pt}_{0.09})_{1.2}(\text{Fe}_{0.78}\text{Cu}_{0.02})_{0.80}$
3	10.76	0.84	0.20	2.08	–	–	49.92	36.51	–	100.31	$(\text{Ir}_{1.14}\text{Pt}_{0.82}\text{Rh}_{0.09}\text{Ru}_{0.01})_{2.06}(\text{Fe}_{0.87}\text{Cu}_{0.08})_{0.94}$
4	10.99	0.67	0.21	1.56	–	–	38.51	47.21	–	99.15	$(\text{Ir}_{0.9}\text{Pt}_{1.09}\text{Rh}_{0.07}\text{Ru}_{0.01})_{2.07}(\text{Fe}_{0.89}\text{Cu}_{0.05})_{0.94}$
5	10.25	1.16	0.19	1.35	–	–	52.18	34.39	–	99.52	$(\text{Ir}_{1.2}\text{Pt}_{0.8}\text{Rh}_{0.09})_{2.09}(\text{Fe}_{0.83}\text{Cu}_{0.08})_{0.91}$
6	10.37	6.91	0.16	3.57	6.23	–	27.30	35.13	8.45	98.12	$\text{Pt}_{0.24}\text{Ir}_{0.19}\text{Rh}_{0.04}\text{Pd}_{0.08}\text{Fe}_{0.25}\text{Cu}_{0.14}\text{Hg}_{0.06}$
7	12.03	5.36	0.69	4.63	1.62	–	34.77	36.83	2.61	98.54	$\text{Pt}_{0.25}\text{Ir}_{0.24}\text{Rh}_{0.06}\text{Pd}_{0.02}\text{Ru}_{0.01}\text{Fe}_{0.29}\text{Cu}_{0.11}\text{Hg}_{0.02}$

Os и Ru в таких зернах обычно ниже предела обнаружения. В ассоциации с холлингуортитом обнаруживаются единичные зерна сходного по составу минерала (RhSbS) с сурьмой вместо мышьяка, который, возможно, является его структурным аналогом. Этот минерал формирует небольшие прожилки в туламините (рис. 4д).

В виде включений в туламините распространены выделения стехиометричного Cu_3Pt (рис. 7а). По границам туламинита в таких зернах развиваются вторичные минералы из сложной смеси платиноидов, Fe, Cu и незначительной примеси Hg (табл. 5, ан. 6, 7. На границах минеральных зерен выделяется тонкая кайма потарита (PdHg)).

В изоферроплатине также широко распространены включения пентландита с повышенным содержанием Rh (до 12 мас. %). Помимо вышеперечисленных минеральных включений в изоферроплатине обнаружено единственное зерно сложного по составу оксидного соединения Ir, предположительно образованного по кристаллу Os-Ir интерметаллида (рис. 7е).

Обсуждение результатов и выводы

Для хромшпинелидов массива Жёлтая Сопка установлено отсутствие выраженного хромит-магнетитового тренда, характерного для большинства массивов ППУ (Лазаренков и др., 1992). Хромшпинелиды Жёлтой Сопки существенно сильнее обеднены трехвалентным железом, чем в других массивах Северного и Среднего Урала. Количество хромититовых шлиров и различных сегрегаций хромшпинелидов в массиве незначительно, что может быть обусловлено как эрозионным срезом, так и низкой концентрацией Cr и Fe в силикатном расплаве, из которого по ликвационной модели сформировались хромититовые зоны с повышенной концентрацией ЭПГ (Округин, 2004).

Разделение МПГ на ассоциации и парагенезисы проведено с учетом результатов предыдущих исследований, в ходе которых была доказана последовательность кристаллизации минералов: иридий осмий \rightarrow хромшпинелид \rightarrow лаурит-эрликманит \rightarrow осмистый иридий \rightarrow изоферроплатина (Толстых, 2004; Зайков и др., 2016; Козлов и др., 2019). Минеральные индивиды, близкие по составу к самородному осмию, возможно, образовались в процессе охлаждения системы (вероятно, в процессе серпентинизации дунитов) поскольку встречаются в виде структур, напоминающих продукты

распада твердого раствора, однако отсутствие закономерной ориентировки осмиевых пластинок в изоферроплатине противоречит принципам такого механизма формирования, что позволяет предположить их кристаллизацию раньше изоферроплатины. К позднему парагенезису ряд минералов отнесен ввиду их полного отсутствия в Pt-Fe интерметаллидах. Они встречаются в виде включений в туламините и каймах вторичных преобразований по Pt-Fe интерметаллидам.

В целом, ассоциация МПГ массива Жёлтая Сопка характеризуется абсолютным преобладанием Pt-Fe интерметаллидов, а именно, изоферроплатины, что характерно для большинства массивов ППУ (Лазаренков и др., 1992; Толстых и др., 2011; Малич и др., 2017; Паламарчук и др., 2017), хотя в Нижнетагильском массиве преобладает железистая платина (Auge et al., 2005; Толстых и др., 2011). При этом в породах Жёлтой сопки прослеживаются почти все промежуточные составы между соединениями Pt_3Fe и Pt_2Fe , что, в целом, не характерно для большинства массивов ППУ. Ранее ассоциация платиноидов с таким соотношением Pt-Fe минералов была установлена только для россыпи р. Вересовка на Среднем Урале (Степанов и др., 2018а). Среди вторичных минералов из группы тетраферроплатины установлена Ni-содержащая разновидность, близкая по составу к ферроникельплатине, ранее выявленной только в хромитах Нижнетагильского (Степанов, 2015; Толстых и др., 2011; Auge et al., 2005) и Иовского (Паламарчук и др., 2017) дунитовых массивов.

Набор включений в Pt-Fe интерметаллидах массива Жёлтая Сопка с преобладанием Os-Ir-Ru интерметаллидов и подчиненным распространением минералов изоморфного ряда лаурит-эрликманит, в целом, аналогичен ранее установленным парагенезисам в коренных хромититах Вересовоборского (Степанов и др., 2017), Светлоборского, Каменушенского (Толстых и др., 2011), Нижнетагильского (Tolstikh et al., 2015) и других зональных массивов Урала.

Особенностью коренной платиновой минерализации массива Жёлтая Сопка является широкое распространение включений минералов наложенной ассоциации, таких как: фаза Cu_3Pt , потарит, сульфостибниды ЭПГ и сульфоарсениды ЭПГ ряда ирарсит-холлингуортит. Включения фазы Cu_3Pt ранее были описаны для ассоциаций МПГ Нижнетагильского и Вересовоборского массивов (Степанов, 2015). Ирарсит и холлингуортит в виде вклю-

чений повсеместно встречаются в незначительных количествах. В ассоциации с холлингуортитом обнаружен минерал состава $RhSbS$, описанный ранее в Миасской россыпной зоне (Зайков и др., 2016), где авторы связали процессы изменения МПП с гидротермальным преобразованием клинопироксенит-дунитовых массивов.

Впервые в пределах ППУ обнаружены минакаваит ($RhSb$) и чендеит (Ir_3Fe). Минакаваит ранее был выявлен в клинопироксенитах на юго-западе острова Хонсю в виде ксеноморфных включений в изоферроплатине (Nishio-Hamane et al., 2019), а чендеит был обнаружен в россыпях р. Луаньхе (Zuxiang, 1996), генетически связанных с хромит-дунитовыми интрузиями, а также в пределах Бор-Урхского массива в Средней Сибири (Malich, Kodar, 2011).

В составе включений пентландита в изоферроплатине фиксируются значительные примеси Rh , что ранее было отмечено для пентландита Нижнетагильского массива (Генкин и др., 1974). Высокое содержание Rh тогда объяснялось гидротермальным метаморфизмом, связанным с серпентинизацией дунитов и изменением первичных $Pt-Fe$ интерметаллидов, в которых, как правило, содержатся незначительные примеси Rh и Ru . Было показано, что в процессе серпентинизации происходит локальная миграция ЭПГ вследствие их гидротермальной мобилизации. Некоторые исследователи также отмечали небольшое перераспределение ЭПГ в процессе серпентинизации дунитов (Козлов и др., 2019).

Впервые в хромититах Северного Урала обнаружены оксиды Ir . Ранее подобные соединения были описаны только в россыпных ассоциациях ручья Прижимный (Корякское Нагорье) (Кутырев и др., 2018), хромититах Нуралинского массива (Garuti et al., 1997) и россыпях Дальнего Востока (Мочалов, 2001), где их образование объясняется влиянием пожаров, но нахождение оксида Ir в коренном источнике позволяет подвергнуть эту гипотезу сомнению. Оксид может оказаться сростанием $Os-Ir$ с гётитом и лимонитом: такие сростания описаны в хромитах из офиолитового комплекса Вуринос (Garuti, Zaccarini 1995, 1997). Окисление $Os-Ir$ соединений связывают с десульфацией лаурита-эрликманита в ходе метаморфизма на постмагматическом этапе (Garuti et al., 1997), чем может быть обусловлено незначительное количество этих минералов в ассоциации МПП.

В целом, исследованная ассоциация МПП из хромититов массива Жёлтая Сопка характерна для массивов Урало-Аляскинского типа и по минеральному составу наиболее близка к россыпной ассоциации р. Вересовка на Среднем Урале и ассоциации Иовского дунитового тела на Северном Урале. Она включает в себя широкий спектр минералов: от $Pt-Fe$ интерметаллидов и минералов $Os-Ir$ состава до сложных сульфоарсенидов, потарита и сульфастибнидов ЭПГ со следами гидротермального преобразования.

Авторы признательны директору государственного геологического заповедника «Денежский Камень» А.Е. Квашиной за предоставленную возможность проведения научно-исследовательских работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00151\18.

Литература

- Бетехтин А.Г. (1935) Платина и другие минералы платиновой группы. Москва, АН СССР, 148 с.
- Высоцкий Н.К. (1913) Месторождения платины Исовского и Нижне-Тагильского районов на Урале. *Труды Геологического комитета*, (62), 692 с.
- Генкин А.Д., Лапутина И.П., Муравицкая Г.Н. (1974) Рутений- и родийсодержащий пентландит – показатель гидротермальной мобилизации платиновых металлов. *Геология рудных месторождений*, (6), 102–106.
- Заварицкий А.Н. (1928) Коренные месторождения платины на Урале / Материалы по общей и прикладной геологии, Ленинград, Изд-во Геологического комитета. 64 с.
- Зайков В.В., Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. (2016) Сростки минералов ЭПГ в Миасской россыпной зоне (Южный Урал) и их коренные источники. *Минералогия*, (4), 31–47.
- Иванов О.К. (1997) Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 488 с.
- Козлов А.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Минibaев А.М. (2019) Онтогенетические ориентиры для выбора модели формирования платинового оруденения в зональных клинопироксенит-дунитовых массивах Урала. *Записки Российского минералогического общества*, 148 (2), 115–130.
- Кузьмин И.А., Степанов С.Ю., Корнеев А.В., Паламарчук Р.С. (2020). Связь процессов концентрирования платины со структурно-вещественными особенностями дунитов на примере зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Урала. *Металлогения древних и современных океанов-2020. Критические металлы в рудообразующих системах*. Миасс, Южно-

Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 128–132.

Кутырев А.В., Сидоров Е.Г., Антонов А.В., Чубаров В.М. (2018) Платинометалльная ассоциация ручья Прижимный (Корякское нагорье). *Геология и геофизика*, 9(8), 1164–1175.

Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О. (1992) Платинометалльная минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. Ленинград, Недра, 217 с.

Малич К.Н., Степанов С.Ю., Баданина И.Ю., Хиллер В.В. (2017) Коренная платиноидная минерализация зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала. *Доклады Академии наук*, 476(4), 440–444.

Мосин К.И. (2000) История добычи платины на Урале. Нижняя Тура, Нижнетурунская типография, 246 с.

Мочалов А.Г., Дмитренко Г.Г., Рудашевский Н.С., Жерновский И.В., Болдырева Н.Н. (1998). Гексаферрум (Fe, Ru), (Fe, Os), (Fe, Ir) – новый минерал. *Записки Российского минералогического общества*, 127(5), 41–51.

Мочалов А.Г. (2001) «Шлиховая платина» россыпей Дальнего Востока России. *Автореф. дис. на соиск. степ. доктора геол.-мин. наук*. Москва, ИГЕМ РАН, 48 с.

Округин А.В. (2004) Кристаллизационно-ликвационная модель формирования платиноидно-хромитовых руд в мафит-ультрамафитовых комплексах. Тихоокеанская геология, 23(2), 63–75.

Павлов Н.В., Григорьева И.И., Гришина Н.В. (1979) Образование и генетические типы хромитовых месторождений геосинклинальных областей / Условия образования магматических рудных месторождений. М., Наука, 65–79.

Паламарчук Р.С., Степанов С.Ю., Ханин Д.А., Антонов А.В. (2017) Платиновая минерализация массивных хромититов Иовского дунитового тела (Северный Урал). *Вестник Московского государственного университета. Серия геология*, (5), 68–76.

Петров Г.А., Ильясова Г.А., Тристан Н.И. и др. (2008) Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист Р-40-XXXVI (Североуральск). Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 124 л.

Степанов С.Ю. (2015) Сравнительная характеристика платиновой минерализации Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского дунит-клинопироксенитовых интрузивов (Средний Урал, Россия). Новые данные о минералах, 50, 29–37.

Степанов С.Ю., Малич К.Н., Козлов А.В., Баданина И.Ю., Антонов А.В. (2017) Платиноидная минерализация Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала (Россия). *Геология рудных месторождений*, 59(3), 238–250.

Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Варламов Д.А. (2018a) Минералы платиновой группы из делювиальной россыпи р. Вересовка, Вересовоборский клинопироксенит-дунитовый массив (Средний Урал, Россия). *Записки Российского минералогического общества*, 147(5), 40–60.

Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Ханин Д.А., Варламов Д.А., Антонов А.В. (2018b) Распределение и форма нахождения элементов платиновой группы в хромититах Светлоборского, Вересовоборского и Каменушенского клинопироксенит-дунитовых массивов (Средний Урал). *Вестник Московского государственного университета. Серия геология*, (5), 60–69.

Толстых Н.Д. (2004) Минеральные ассоциации платиноносных россыпей и генетические корреляции с их коренными источниками. *Автореф. дис. на соиск. степ. доктора геол.-мин. наук*. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 33 с.

Толстых Н.Д., Телегин Ю.М., Козлов А.П. (2011) Коренная платина Светлоборского и Каменушенского массивов Платиноносного Пояса Урала. *Геология и геофизика*, 52(6), 775–793.

Auge T., Genna A., Legendre O., Ivanov K.S., Volchenko Yu. A. (2005) Primary platinum mineralization in the Nizhny Tagil and Kachkanar ultramafic complexes, Urals, Russia: A genetic model for PGE concentration in chromite-rich zones. *Economic Geology*, 100, 707–732.

Cabri L.J. (2002) The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. Montreal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. CIM Special Volume, 54. 852 p.

Cabri L., Aiglsperger T. A (2018) Review of hexaferum based on new mineralogical data. *Mineralogical Magazine*, 82(3), 531–538.

Challis G.A. (1975) Native nickel from the Jerry River, South Westland, New Zealand: an example of natural refining. *Mineralogical Magazine*, 40, 247–251.

Garuti G., Zaccarini F. (1995) Platinum-group minerals in chromitites from Vourinos and Othrys ophiolite complexes (Greece): further findings. *IJNESCG-IUGS Workshop on Albanian ophiolites and related mineralization*, 360–372.

Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitites of the Vourinos complex, Greece. *Canadian Mineralogist*, 34, 611–626.

Garuti G., Zaccarini F., Cabella R., Fershtater G. (1997) Occurrence of unknown Ru-Os-Ir-Fe oxides in the chromitites of the Nurali ultramafic complex, Southern Urals, Russia. *Canadian Mineralogist*, 35, 1431–1439.

Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canadian Mineralogist*, 29, 231–237.

Malitch K.N., Kogarko L.N. (2011) Chemical composition of platinum-group minerals from the Bor-

Uryakh massif, Maimecha-Kotui province, Russia. *Doklady Earth Sciences*, **440**(2), 1455–1459.

McDonald A.M., Proenza J.A., Zaccarini F., Rudashevsky N.S., Cabri L.J., Stanley C.J., Rudashevsky V.N., Melgarejo J.C., Lewis J.F., Longo F., Bakker R.J. (2010) Garuitite, (Ni, Fe, Ir), a new hexagonal polymorph of native Ni from Loma Peguera, Dominican Republic. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 293–304.

Nishio-Hamane D., Tanaka T., Shnimachi T. (2019) Minakawaite and platinum-group minerals in the placer from the clinopyroxenite area in serpentinite mélange of Kurosegawa belt, Kumamoto Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **114**, 252–262.

Tolstykh N., Kozlov A., Telegin Y. (2015) Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt. *Ore Geology Reviews*, **67**, 234–243.

Zuxiang Yu. (1996) Chendeite – a new mineral of Older natural iron-iridium alloy. *Acta Geologica Sinica*, **69**, 215–220.

References

Auge T., Genna A., Legendre O., Ivanov K.S., Volchenko Yu. A. (2005) Primary platinum mineralization in the Nizhny Tagil and Kachkanar ultramafic complexes, Urals, Russia: A genetic model for PGE concentration in chromite-rich zones. *Economic Geology*, **100**, 707–732.

Betekhtin A.G. (1935) [Platinum and other platinum, group minerals]. Moscow, AN SSSR, 148 p. (in Russian)

Cabri L.J. (2002) The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements. Montreal, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. CIM Special Volume, 54. 852 p.

Cabri L., Aiglsperger T. A. (2018) Review of hexaferrum based on new mineralogical data. *Mineralogical Magazine*, **82**(3), 531–538.

Challis G.A. (1975) Native nickel from the Jerry River, South Westland, New Zealand: an example of natural refining. *Mineralogical Magazine*, **40**, 247–251.

Garuti G., Zaccarini F. (1995) Platinum-group minerals in chromitites from Vourinos and Othrys ophiolite complexes (Greece): further findings. *IJNESC-GIUGS Workshop on Albanian ophiolites and related mineralization*, 360–372.

Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitites of the Vourinos complex, Greece. *Canadian Mineralogist*, **34**, 611–626.

Garuti G., Zaccarini F., Cabella R., Fershtater G. (1997) Occurrence of unknown Ru-Os-Ir-Fe oxides in the chromitites of the Nurali ultramafic complex, Southern Urals, Russia. *Canadian Mineralogist*, **35**, 1431–1439.

Genkin A.D., Laputina I.P., Muravitskaya G.N. (1974) [Ru- and Rh-bearing pentlandite – an indicator of hydrothermal mobilization of platinum metals]. *Geologiya*

rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits], (6), 102–106. (in Russian)

Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canadian Mineralogist*, **29**, 231–237.

Ivanov O.K. (1997) [Concentrically zonal pyroxenite-dunite massifs of the Urals]. Yekaterinburg, UGGU, 448 p. (in Russian)

Kozlov A.V., Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Minibaev A.M. (2019) [Ontogenetic keys for the model of the formation of Pt-bearing mineralization in zonal clinopyroxenite-dunite massifs of the Urals]. *Zapiski Vserossiyskogo Mineralogicheskogo Obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, (2), 115–130. (in Russian)

Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Chubarov V.M., Antonov A.V. (2018) Platinum-group mineral assemblage of the Prizhimny Creek (Koryak Highland). *Russian Geology and Geophysics*, **59**(8), 935–944.

Kuzmin I.A., Stepanov S.Yu., Korneev A.V., Palamarchuk R. S. (2020) [A link between processes of Pt concentration with structural-compositional features of dunites: example of zonal clinopyroxenite-dunite massifs of the Urals]. *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2020. Kriticheskie metally v rudoobrazuyushchikh sistemakh [Metallogeny of ancient and modern oceans-2020. Critical metals in ore-forming systems]*. Miass, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, 128–132. (in Russian)

Lazarenkov V.G., Malitch K.N., Sakhyanov L.O. (1992) [Platinum-mineralization of zonal ultrabasic and komatiite massifs]. Leningrad, Nedra, 217 p. (in Russian)

Malitch K.N., Kogarko L.N. (2011) Chemical composition of platinum-group minerals from the Bor-Uryakh Massif, Maimecha-Kotui Province, Russia. *Doklady Earth Sciences*, **440** (2), 1455–1459.

Malitch K.N., Stepanov S.Y., Badanina I.Y., Khiller V.V. (2017) Bedrock platinum-group element mineralization of zonal clinopyroxenite-dunite massifs of the Middle Urals. *Doklady Earth Sciences*, **440**(2), 1455–1459.

McDonald A.M., Proenza J.A., Zaccarini F., Rudashevsky N.S., Cabri L.J., Stanley C.J., Rudashevsky V.N., Melgarejo J.C., Lewis J.F., Longo F., Bakker R.J. (2010) Garuitite, (Ni, Fe, Ir), a new hexagonal polymorph of native Ni from Loma Peguera, Dominican Republic. *European Journal of Mineralogy*, **22**, 293–304.

Mochalov A.G., Dmitrenko G.G., Rudashevsky N.S., Zhernovsky I.V., Boldyreva M.M. (1998) [Hexaferrum (Fe, Ru), (Fe, Os), (Fe, Ir) – a new mineral]. *Zapiski Vserossiyskogo Mineralogicheskogo Obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **127**(5), 41–51 (in Russian).

Mochalov A.G. (2001) [Platinum placers of the Far East of Russia]. *Abstracts of Dissertation of Doctor of Geological-Mineralogical Sciences*. Moscow, IGM RAN, 48 p. (in Russian)

- Mosin K.I.** (2000) [History of Pt mining in the Urals]. Nizhnaya Tura, Nizhneturinskaya tipografiya, 246 p. (in Russian)
- Nishio-Hamane D., Tanaka T., Shnimachi T.** (2019) Minakawaite and platinum-group minerals in the placer from the clinopyroxenite area in serpentinite mélange of Kurosegawa belt, Kumamoto Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **114**, 252–262.
- Okrugin A.V.** (2004) [Crystallization-liquation model of the formation of PGE-chromitite ores in mafic-ultramafic complexes]. *Tikhookeanskaya geologiya [Russian Journal of Pacific Geology]*, **23**(2), 63–75 (in Russian)
- Pavlov N.V., Grigoreva I.I., Grishina N.V.** (1979) [Formation and genetic types of chromite deposits of geosyncline regions]. In: *Usloviya obrazovaniya magmaticheskikh rudnykh mestorozhdenii [Formation conditions of magmatic ore deposits]*. Moscow, Nauka, 65–79 (in Russian).
- Palamarchuk R.S., Stepanov S.Y., Khanin D.A., Antonov A.V.** (2017) PGE mineralization of massive chromitites of the Iov dunite body (Northern Urals). *Moscow University Geology Bulletin*, **72**(6), 445–454.
- Petrov G.A., Ilyasova G.A., Tristan N.I. et al.** (2008) [Explanatory note. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. Sredneural'skaya series. Sheet P-40-XXXVI (Severouralsk). St. Petersburg, VSEGEI, 124 p. (in Russian)
- Stepanov S.Y.** (2015) [Comparative characteristics of Pt mineralization of the Svetly Bor, Veresovy Bor and Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite intrusives (Central Urals, Russia)]. *Novyye dannyye o mineralakh. (New Data on Minerals)*, **50**, 29–37. (in Russian)
- Stepanov S.Y., Kozlov A.V., Malitch K.N., Badanina I.Y., Antonov A.V.** (2017) Platinum group element mineralization of the Svetly Bor and Veresovy Bor clinopyroxenite-dunite massifs, Middle Urals, Russia. *Geology of Ore Deposits*, **59**(3), 244–255.
- Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kozlov A.V., Khanin D.A., Antonov A.V.** (2018a) [Platinum group minerals from a deluvial placer of the Veresovka River, Veresovy Bor dunite-clinopyroxenite massif (Central Urals)]. *Zapiski Vserossiyskogo Mineralogicheskogo Obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **147**(5), 40–60 (in Russian)
- Stepanov S.Y., Palamarchuk R.S., Khanin D.A., Varlamov D.A., Antonov A.V.** (2018b) The distribution and speciation of PGES in chromitite from the Svetloborsky, Veresovoborsky and Kamenushensky clinopyroxenite-dunite massifs (Middle Urals). *Moscow University Geology Bulletin*, **73**(6), 527–537.
- Tolstykh N., Kozlov A., Telegin Y.** (2015) Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt. *Ore Geology Reviews*, **67**, 234–243.
- Tolstykh N.D., Telegin Yu.M., Kozlov A.P.** (2011) Platinum mineralization of the Svetloborsky and Kamenushensky massifs (Urals Platinum Belt). *Russian Geology and Geophysics*, **52**(6), 603–619.
- Vysotsky N.K.** (1913) [Platinum deposits of the Isov and Nizhny Tagil districts of the Urals]. *Trudy Geologicheskogo romiteta [Proceedings of the Geological Committee]*, (62), 692 p. (in Russian)
- Zavaritsky A.N.** (1928) [Primary Pt deposits of the Urals]. In: *Materialy po obshchey i prikladnoy geologii [Materials on General and Applied Geology]*. Leningrad, Izdatelstvo Geologicheskogo Komiteta. 64 p. (in Russian)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Kotlyarov V.A., Zaykova E.V., Kraynev Yu.D.** (2016) [Intergrowths of platinum group minerals from the Miass placer zone (South Urals) and their primary sources]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, (4), 31–47. (in Russian)
- Zuxiang Yu.** (1996) Chendeite – a new mineral of Oldered natural iron-iridium alloy. *Acta Geologica Sinica*, **69**, 215–220.

Поступила в редакцию 1 мая 2020 г.

После доработки 9 октября 2020 г.

Принято в печать 13 ноября 2020 г.