——— МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ ———

МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ ИЗ ХРОМОВЫХ РУД УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА РАЙ-ИЗ (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): НОВЫЕ ДАННЫЕ

© 2024 г. А. Н. Юричев*, А. И. Чернышов, Е. В. Корбовяк

Томский государственный университет, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия *e-mail: juratur@yandex.ru

> Поступила в редакцию 19.10.2023 После доработки 01.10.2024 Принята к публикации 09.10.2024

В хромитовых рудах месторождений Центральное и № 214 ультрамафитового массива Рай-Из, входящего в состав Хадатинского офиолитового пояса Полярного Урала, наряду с известными ранее минералами платиновой группы (МПГ) впервые обнаружены и охарактеризованы самородный железистый рутений, самородный никель рутенистый (иридисто-рутенистый), самородная платина, новый интерметаллид (Rh,Pt)₂Zn (с содержанием Rh до 88 мас. %), мышьяксодержащие дисульфиды ряда лаурит–эрлихманит (с содержанием As до 4.2 мас. %), а также неназванный сульфоарсенид со стехиометрической формулой Ir,Os(S,As). Впервые диагностированы зерна самородного рутения с содержанием Ru до 80.5 мас. %, против ранее известного с содержанием Ru до 36.8 мас. %. Набор МПГ массива расширен с 24 до 31 минеральных разновидностей. Показано, что разнообразие МПГ зависит от густоты вкрапленности хромитовых руд. степени их катаклаза и метаморфического преобразования. Сплошные (массивные) и заметно метаморфизованные хромитовые руды обнаруживают в своем составе наиболее широкий и разнообразный набор МПГ. В массиве Рай-Из сохранились комплексы МПГ, отражающие особенности верхне-мантийного минералообразования. К таким ранним мантийно-магматическим образованиям отнесены самородный осмий, самородный Ir-содержащий осмий, самородный иридий и сульфиды (дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда, кашинит и купроиридсит). Образование остальных самородных минералов и интерметаллидов ЭПГ, сопровождавшееся осаждением подвижных металлов (Ni, Cu, Zn, Mn, As) и частичным выносом сульфидной серы, связывается с катаклазом и метаморфическим преобразованием рудных хромшпинелидов и включенных в них первичных МПГ. Выявленные вторичные МПГ сформировались преимущественно на регионально-метаморфическом (регрессивном) этапе [самородный рутений, самородный рутенистый никель, неназванная фаза Ru, Ni, Os, Fe, As-содержащие дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда и неназванный сульфоарсенид Ir,Os(S,As)], а также, в меньшей степени, на контактовометаморфическом (прогрессивном) этапе (самородный железистый рутений, самородная платина и новый интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn).

Ключевые слова: Полярный Урал, офиолиты, массив Рай-Из, хромитовые руды, минералы платиновой группы

DOI: 10.31857/S0869605524060038, EDN: NWOZCL

введение

Исследования особенностей распределения элементов платиновой группы (ЭПГ) в породах и рудах массива Рай-Из начались еще в середине 70-х годов XX века. Однако они касались главным образом геохимической специализации пород и руд. С появлением новых аналитических методов изучения минералов платиновой группы (МПГ), характеризующихся мелкими размерами выделений (5–20 мкм) и большой рассеянностью в породах, направление работ сместилось в сторону исследования минералогии МПГ.

В 1981 г. Ю.А. Волченко обнаружил в шлихах из аллювиальных отложений вблизи западного контакта массива Рай-Из самородный платинистый иридий, рутениридосмин, самородный осмий и осмисто-медистый лаурит в виде нескольких зерен размером 70–360 мкм (Строение..., 1990). В 1984 г. А.Б. Макеевым с соавторами эти данные были дополнены находками рутениридосмина и самородного осмия в аллювиальных отложениях р. Кузь-Ты-Вис, стекающей с западного склона данного массива (Макеев и др., 1984). Позднее, по результатам экспедиционных работ в период 1988–1991 гг., Е.В. Аникина и В.Ю. Алимов описали в хромитовых рудах массива сульфиды, сульфоарсениды и арсениды ЭПГ, выделив два парагенезиса: ранний, синхронный с образованием рудного хромшпинелида (лаурит, эрлихманит, купроиридсит, Ir–Rh–Ni–Fe–Сu сульфиды), и поздний, связанный с привносом мышьяка и сурьмы (минералы ряда ирарсит–холлингвортит, руарсит, руарсенит, сперрилит) (Аникина и др., 1993; Аникина, 1995).

В 1994 г. А.Б. Макеев выявил постоянное присутствие примеси ЭПГ в акцессорных Fe-Cu-Ni сульфидах из пород и руд данного массива (Макеев, 1994; Макеев, Брянчанинова, 1999). В 1999 г. на массиве Рай-Из были отобраны образцы хромитовой руды из месторождений Центральное (рудные тела №№ 43, 302, 316, 328), Западное (рудное тело № 21) и рудопроявления Полойшорское 2. В результате, наряду с ранее выявленными МПГ, были впервые обнаружены кашинит, черепановит, родиевый пентландит (с содержанием Rh до 8.0 %) и неназванный минерал (Rh,Ni)₂As (Garuti et al., 1999).

Наиболее полный обзор по платиноносности массива Рай-Из был сделан Л.И. Гурской с соавторами (Гурская и др., 2004). В этом обзоре были обобщены данные по платиноносности Полярноуральского региона, полученные на протяжении 1993–2002 гг., а также приведены результаты новых исследований распределения платиноидов и МПГ в хромитовых рудах центральной и юго-западной частей массива (месторождения Центральное и Западное, рудопроявление Юго-Западное) (Гурская и др., 2004). В полированных шлифах из хромитовых руд были обнаружены и описаны самородный осмий, лаурит, ирарсит, купроиридсит и эрлихманит. Изучение концентратов тяжелых фракций позволило выявить 11 МПГ: самородные иридий и осмий, рутениридосмин, лаурит, эрлихманит, купроиридсит, кашинит, толовкит, ирарсит, холлингвортит и новый неназванный минерал состава Iг₂(Ni,Cu,Fe)₄S₇.

В 2006 г., в ходе совместной русско-китайской экспедиции на массив Рай-Из, из двух крупнообъемных проб хромитовой руды, отобранных на месторождениях Центральное (~900 кг) и № 214 (~600 кг), было выделено более 60 минералов, включая алмаз (кристаллы размером до 0.2 мм), муассанит, платиноиды (выделения размером до 200 мкм), другие самородные элементы и металлические сплавы (Yang et al., 2015). По минералам платиновой группы эти результаты были обобщены в обзорной работе А.Б. Макеева и Н.И. Брянчаниновой (Макеев, Брянчанинова, 2017). В двух последних работах список МПГ из массива Рай-Из дополнился еще 4 фазами: самородным рутением, изоферроплатиной Pt₃Fe, родистой изоферроплатиной Rh-Pt₃Fe и медисто-никелистой тетраферроплатиной Pt₁₀Fe_{0.5}Cu_{0.3}Ni_{0.2}.

Настоящая работа направлена на изучение особенностей распределения платиноидов и их минеральных форм в полированных шлифах хромитовых руд из центральной и юго-западных частей массива Рай-Из (месторождения Центральное и № 214 соответственно), признанных предыдущими работами наиболее платиноносными. Наряду с ранее диагностированными МПГ впервые выявлены и охарактеризованы: самородный железистый рутений, самородный никель рутенистый (иридисторутенистый), самородная платина, неназванный интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn с содержанием родия до 88 мас. %, переходные от сульфидов к сульфоарсенидам фазы – мышьяксодержащие дисульфиды ряда лаурит–эрлихманит, а также неназванный сульфоарсенид со стехиометрической формулой Ir,Os(S,As). Также впервые обнаружены зерна самородного рутения с содержанием рутения до 80.5 мас. %, против ранее выявленного самородного рутения с содержанием рутения до 36.8 мас. % (Макеев, Брянчанинова, 2017).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Ультрамафитовый массив Рай-Из является фрагментом Хадатинского офиолитового пояса Полярного Урала и расположен между двумя наиболее крупными массивами Войкаро-Сыньинским и Сыум-Кеу (рис. 1). Массив находится в бассейне верхнего течения рек Собь и Бол. Хараматолоу. Он имеет в плане форму полумесяца, выпуклой стороной обращенного на северо-запад. Площадь выхода ультрамафитов около \sim 380 км², при максимальной ширине 16 км и длине – 28 км (Вахрушева и др., 2017). По геолого-геофизическим данным массив рассматривается как аллохтонная пластина мощностью более 1.5 км, надвинутая на миогеосинклинальные и платформенные комплексы западного склона Урала (Гурская и др., 2004). Контакты тектонические, северный и южный падают на юго-восток, северный – под углом 35–40°, южный – под углом 75–90° (Строение.., 1990). Восточный контакт, скрытый под аллювиальными отложениями, также тектонический, на что указывают характер магнитного поля, а также крутые уступы в рельефе, разделяющие ультрамафиты и вмещающие метаморфические сланцы, круто падающие под массив. На западе массив ограничивается субмеридиональным разломом, который прослеживается далеко на юг за пределами массива. Его строение осложнено поперечными разрывными нарушениями с амплитудой от первых сотен метров до 1 км.

Практически на всем протяжении южного контакта массив Рай-Из граничит с габброидами, среди которых отмечаются отдельные линзовидные тела верлитов и клинопироксенитов. Предполагается, что габброиды, рассчитанная мощность которых составляет не менее 10 км, не только частично перекрывают, но и подстилают массив. Геолого-геофизические данные свидетельствуют о том, что массив Рай-Из представляет собой клиновидное бескорневое тело, лежащее частично (северной частью) на докембрийских и палеозойских породах, а частично – на габброидах офиолитовой ассоциации.

Большая часть массива сложена породами дунит-гарцбургитовой серии, среди которых преобладают гарцбургиты, в различной мере насыщенные жилообразными, шлировидными и линзовидными телами дунитов и в меньшей степени — пироксенитов. Лерцолиты встречаются крайне редко, преимущественно в виде обособлений среди гарцбургитов. Гарцбургиты развиты, главным образом, в северо-западной и юго-восточной частях массива и характеризуются выдержанным минеральным составом с высоким содержанием энстатита (20–35 %) и высокоглиноземистым составом хромшпинелидов. Размеры дунитовых тел сильно варьируют: по мощности от сантиметров до нескольких метров и по протяженности — от долей метра до десятков метров; присутствуют тела дунитов размером до сотен метров. В составе массива выделяется два крупных дунитовых тела, имеющих штокообразную форму с крутым падением в северо-восточном направлении: Центральное (2 × 4 км), расположенное в южной части, и Южное (1.7 × 4 км) — в юго-западном окончании исследуемого массива.



Рис. 1. Схематическая геологическая карта массива Рай-Из (Кучерина и др., 1991 г.), с редакцией авторов.

I – четвертичные отложения; 2 – палеозойские вулканогенно-осадочные комплексы нерасчлененные; 3 – протерозойские метаморфические комплексы нерасчлененные; 4–11 – Войкаро-Райизский офиолитовый комплекс: 4–5 – дунит-верлит-клинопироксенитовый структурно-вещественный комплекс (CBK): 4 – дуниты, верлиты, клинопироксениты нерасчлененные; 5 – габбро, метагаббро; 6–9 – дунит-гарцбургитовый CBK: 6 – истощенные гарцбургиты с дунитовой составляющей <10 %; 7 – истощенные гарцбургиты с дунитовой составляющей >30 %; 9 – дуниты с хромистым хромшпинелидом; 10–11 – гарцбургитовый CBK: 10 – неистощенные гарцбургиты с дунитовой составляющей <10%; 11 – неистощенные гарцбургиты с дунитовой составляющей 10–30 %; 12 – разрывные нарушения; 13 – надвиги; 14 – рудопроявления хромовых руд; 15 – месторождения хромовых руд; 15а – открытые, 156 – изученные в настоящей работе. На врезке дана схема располжения массива Рай-Из в структуре Полярного Урала. Ультрамафитовые массивы: I – Сыум-Кеу, II – Харчерузский, III – Рай-Из, IV – Войкаро-Сыньинский.

Fig. 1. Schematic geological map of the Rai-Iz massif (after Kucherina et al., 1991), edited by authors.

I-Quaternary deposits; 2- undifferentiated Paleozoic volcanogenic-sedimentary complexes; 3- undifferentiated Proterozoic metamorphic complexes; 4-11- Voikaro-Rayiz ophiolite complex: 4-5- dunite-wehrlite-clinopyroxenite structural-material complex (SMC): 4- undifferentiated dunites, wehrlites, clinopyroxenites; 5- gabbro, metagabbro; 6-9- dunite-harzburgite SMC: 6- depleted harzburgites with dunite component <10%; 7- depleted harzburgites with dunite component <10%; 1- undepleted harzburgites with dunite component <10%; 12- faults; 13- thrusts; 14- chromium or occurrences; 15- chromium or deposits: 15a- open, 15b- studied in this work. The inset shows diagram of the location of the Rai-Iz massif in structure of the Polar Urals. Ultramafic massifs: I – Syum-Keu, II – Kharcheruzsky, III – Rai-Iz, IV – Voykar-Syninsky.

Хромитовое оруденение распределено в пределах массива Рай-Из крайне неравномерно. Основная масса хромититов локализована преимущественно вблизи крупных дунитовых тел, иногда внутри них в виде линз неправильной формы. В пределах дунит-гарцбургитового комплекса хромитовые руды проявляются в виде мелких залежей, причем как в дунитах, так и гарцбургитах. Оруденение разнообразно по масштабности, морфологии рудных тел, структурно-текстурным особенностям и составу хромшпинелидов. Согласно классификационной схеме Б.В. Перевозчикова (Перевозчиков и др., 2000) большинство значимых рудопроявлений массива относится к высокохромистому магнезиальному типу.

В результате поисковых и разведочных работ к настоящему времени на массиве Рай-Из выявлены три месторождения хромитовых руд (Центральное, Западное и № 214), более 20 рудопроявлений и свыше 200 точек минерализации (Макеев, Перевозчиков, Афанасьев, 1985; Перевозчиков и др., 2000; Гурская и др., 2004; Вахрушева и др., 2017).

Месторождение Центральное расположено в южной части массива Рай-Из и является самым большим. Оно приурочено к крупному телу дунитов (450×550 м), окруженному дунит-гарцбургитовым комплексом с содержанием дунитов от 10 до 70 %. Месторождение представляет собой сложно построенную хромитоносную зону протяженностью до 1700 м и шириной 400–450 м (площадь ~ 4.7 км), вытянутую в северо-восточном направлении согласно с полосчатостью гарцбургитов и вытянутостью дунитовых обособлений среди гарцбургитов, разделенную субширотными разрывами на четыре блока. Хромитовые руды представлены средне- и густовкрапленными (до сплошных) разновидностями, с зонами развития полосчатых и нодулярных. Редковкрапленные руды встречаются редко. Средне-, густовкрапленные и сплошные разновидности хромитовых руд практически не метаморфизованы, что отражается в хорошей корреляции магния и железа. В то же время для убоговкрапленных хромитовых руд характерно заметное возрастание содержания железа, что связано с развитием вторичного хроммагнетита по хромовой шпинели. Все рудообразующие хромовые шпинели соответствуют высокохромистому типу (Вахрушева и др., 2017; Garuti et al., 1999).

В настоящей работе Центральное месторождение изучено на примере рудного тела № 9, которое является самым крупным, обладая наибольшей мощностью (8.2 м) и длиной по простиранию (65 м). Рудные тела характеризуются достаточно однородным внутренним строением и сложены, главным образом, средневкрапленными и густовкрапленными рудами (рис. 2, $a-\delta$). Структура руд в основном равномерновкрапленная, равномернозернистая, средне-крупнозернистая.

Силикатная часть руд представлена агрегатом зерен оливина, который частично (от 0 до 15–20 %) замещается петельчатым серпентином. Частично матрикс руд сложен агрегатами хлорита. Хлорит: в шлифе бесцветен, зачастую имеет аномальную индигово-синюю интерференционную окраску, нередко выполняет отрицательные кристаллы в крупнозернистой хромовой шпинели.

Изученные в работе образцы показывают высокое качество руды с содержаниями Cr_2O_3 в рудообразующих хромшпинелидах — 59.4—63.2 мас. %. По составу последние преимущественно отвечают магнезиальному хромиту, реже — магнезиальному субферрихромиту (табл. 1, рис. 3).

Месторождение № 214 расположено в 1.5 км к юго-западу от месторождения Западное и залегает в дунит-гарцбургитовой зоне с содержанием дунитовой составляющей от 10 до 70 %. Оно состоит из шести уплощенных рудных линз северо-восточного простирания, с раздувами, пережимами и апофизами, длиной от 30–50 до 450 м, мощностью от 0.6 до 4.7 м и расстоянием между рудными телами 0.6–6.0 м (Никольская и др., 2021). Контакты тел резкие, руды густовкрапленные и сплошные, реже – средневкрапленные. Структура руд от мелко- до крупнозернистой (рис. 2, *в*–*г*).



Рис. 2. Микрофотографии средневкрапленных и сплошных хромитовых руд из Центрального месторождения (*a*−*6*, обр. Р-1 и обр. Р-2 соответственно) и месторождения № 214 (*в*−*г*, обр. Ү-340/7 и обр. Ү-325/1 соответственно) массива Рай-Из без анализатора (слева) и с анализатором (справа). *Ol* – оливин, *Serp* – серпентин, *CrSp* – хромшпинель.

Fig. 2. Microphotographs of moderately disseminated and massive chromite ores from the Central deposit (a-6, sample P-1 and sample P-2, respectively) and deposit No 214 (e-e, sample Y-340/7 and sample Y-325/1, respectively) of the Rai-Iz massif without analyzer (left) and with analyzer (right). Ol – olivine, Serp – serpentine, CrSp – chrome spinel.

Table	e 1. Chemi	ical co	ödu	sition	(Mt %	() ore	-form	ning c	hrom	le spine	els, coi	ntainii	ng PG	M incl	usions	, from	l depo	sits of	the R	ai-Iz 1	nassif		
л{п п/п	Образец	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	TiO ₂	$\mathbf{V}_2\mathbf{O}_5$	ZnO	Сумма	Mg	Ā	Cr	Fe^{2+}	Fe ³⁺	Mn	ï	>	Zn	Cr#	Fe ³⁺ #	f	MIIF
										Централ	ьное мес	торожде	ние (руд	ное тело	Nº 9)								
1	P-2-170	14.31	11.76	59.38	13.94	0.17	0.11	0.12	Ι	99.79	0.70	0.45	1.53	0.32	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.15	0.32	1) (Ni,Ru)
2	P-4-38	13.55	9.22	63.18	14.13	0.19	0.10	I	I	100.37	0.66	0.35	1.63	0.35	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.09	0.35	2) (Rh,Pt) ₃ Zn
3	P-2-125	15.21	12.00	59.78	12.37	0.18	0.10	0.08	I	99.72	0.74	0.46	1.54	0.29	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.15	0.28	3) RuS_2
4	P-4-50	13.83	9.38	61.69	14.61	0.29	0.10	0.22	0.15	100.27	0.67	0.36	1.59	0.33	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.16	0.33	4) $Ru(S,As)_2$
5	P-4-136	13.25	7.18	63.06	16.70	0.28	0.16	0.14	I	100.77	0.64	0.28	1.62	0.36	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.85	0.22	0.36	5) OsS,
9	P-4-137	13.52	7.39	62.47	16.51	0.20	0.13	0.12	I	100.34	0.66	0.28	1.61	0.34	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.85	0.23	0.34	6) Os(S,As),
7	P-2-87	14.38	11.87	59.45	13.60	0.29	0.11	0.18	0.12	100.00	0.70	0.46	1.53	0.32	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.77	0.14	0.31	7) Culr.S
8	P-2-105	13.44	9.15	61.03	15.29	0.22	0.09	0.09	0.16	99.47	0.65	0.35	1.57	0.34	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.17	0.35	8) Cu,S c ∋∏Γ*:
6	P-2-163	13.87	11.26	59.96	14.15	0.24	0.09	0.09	0.11	77.66	0.67	0.43	1.54	0.34	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.78	0.13	0.33	Ru+Pd, Rh+Ir
		-]		Mec	торожден	ние Nº 21	4									
10	Y-340/7-119	11.92	9.80	60.05	17.74	0.29	I	0.16	I	96.96	0.58	0.38	1.55	0.41	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.80	0.15	0.42	
Ξ	Y-340/7-140	12.02	9.08	59.44	18.10	0.26	I	0.15	I	99.05	0.58	0.35	1.53	0.40	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.81	0.19	0.41	
12	Y-325/1-186	13.67	8.21	64.16	13.39	0.21	0.10	I	0.13	99.87	0.66	0.32	1.65	0.33	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.84	0.08	0.33	
13	Y-325/1-32	13.75	8.63	61.82	14.28	0.30	0.19	0.10	0.13	99.20	0.67	0.33	1.59	0.33	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.83	0.16	0.33	1) Ru
14	Y-325/1-33	15.95	10.22	59.98	13.72	0.28	0.17	0.11	0.11	100.54	0.77	0.39	1.55	0.26	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.80	0.32	0.25	2) (Ru,Fe)
15	Y-325/1-66	13.70	90.6	62.54	13.94	0.32	0.14	I	0.10	99.80	0.67	0.35	1.61	0.33	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.12	0.33	3) Os, (Os,Ir)
16	Y-325/1-67	13.79	9.06	62.53	13.86	0.29	0.12	I	0.12	77.66	0.67	0.35	1.61	0.33	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.12	0.33	4) Ir
17	Y-325/1-159	13.64	8.90	62.77	14.41	0.31	0.09	I	I	100.12	0.66	0.34	1.62	0.34	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.83	0.13	0.34	5) Pt
18	Y-325/1-160	13.52	8.71	62.68	14.39	0.29	Ι	Ι	I	99.59	0.66	0.33	1.61	0.34	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.83	0.14	0.34	6) (Ru,Ni,Os,Fe)
19	Y-325/1-127	13.55	9.25	62.26	14.22	0.31	Ι	I	I	99.59	0.66	0.36	1.60	0.34	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.13	0.34	7) $(Rh, Pt)_{3}Zn$
20	Y-4/3-60	12.78	9.33	62.89	13.83	0.22	0.09	I	0.08	99.22	0.62	0.36	1.62	0.37	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.02	0.37	8) RuS ₂ , (Ru,Os)S ₂
21	Y-4/3-74	13.39	8.85	60.66	16.06	0.23	0.12	0.11	Ι	99.42	0.65	0.34	1.56	0.35	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.82	0.21	0.35)) (Ru,Ir,Os)(S,As) ₂
22	Y-325/1-22	13.09	3.69	61.85	20.98	0.25	0.08	0.14	T	100.08	0.64	0.14	1.59	0.34	0.23	0.01	0.00	0.00	0.00	0.92	0.40	0.35	10) (Ir,Rh) $_{2}S_{3}$
23	Y-325/1-257	14.98	10.59	59.23	14.66	0.25	0.08	0.17	I	96.66	0.73	0.41	1.53	0.29	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.79	0.27	0.29	11) $CuIr_2S$
24	Y-325/1-47	15.13	9.86	61.03	13.27	0.19	0.11	0.15	Ι	99.74	0.74	0.38	1.57	0.28	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.81	0.22	0.28	12) (Ir,Os)(S,As)
25	Y-325/1-146	15.26	9.98	60.96	13.71	0.24	0.20	0.11	I	100.46	0.74	0.38	1.57	0.28	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.80	0.24	0.28	
26	Y-340/7-179	10.59	6.49	63.54	18.78	0.30	0.20	0.13	0.10	100.13	0.51	0.25	1.64	0.46	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.87	0.11	0.47	
27	Y-325/1-209	13.69	8.73	62.22	14.11	0.24	0.20	0.11	I	99.30	0.67	0.34	1.60	0.33	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.83	0.13	0.33	
Прил	течание. * -	Ш€ -	BBIA	влень	LEICE B]	зиде (леми	кронн	bIX Bk	слючен	ий в ха	UIbK03I	THe (C	ם (Sh	агнос	THDOB	THЫ K3	честве	нно, б	ез иде	нтифи	кации	минерального

4 2 вида. Коэффициенты в формулах хромшпинелидов рассчитаны на 3 катиона.

70

ЮРИЧЕВ и др.



Рис. 3. Состав рудных хромшпинелидов из месторождений Центрального (рудное тело № 9) и № 214 массива Рай-Из на тернарной классификационной диаграмме Н.В. Павлова (Павлов, 1949).

I – 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 ore chrom spinels from the Central (ore body No 9) and No 214 deposits of the Rai-Iz massif on ternary classification diagram by N.V. Pavlov (Pavlov, 1949). 1 - chromite, 2 - subferrichromite, 3 - aluminochromite, 4 - subferrialumochromite, 5 - ferrialumochromite, 6 - subaluminoferrichromite, 7 - ferrichromite, 8 - chromopicotite, 9 - subferrichromopicotite, 10 - subalumochromomagnetite, 11 - chromomagnetites, 12 - picotite, 13 - magnetite.

В изученных образцах рудообразующий хромшпинелид высокохромистый ($Cr_2O_3 - 59.2-63.5$ мас. %) и, по сравнению с этим минералом в рудном теле № 9 Центрального месторождения, характеризуется более высоким содержанием железа и степенью его окисленности (табл. 1). По химическому составу он соответствует магнезиальным хромиту и субферрихромиту (рис. 3), что хорошо согласуется с ранее полученными данными (Вахрушева и др., 2017; Garuti et al., 1999).

Часто в руде отмечаются признаки катаклаза: зерна раздроблены, пересечены густой сетью трещин. Силикатная часть в хромитовых рудах представлена агрегатом зерен оливина, который интенсивно (до 40 %) замещается петельчатым серпентином. Нередко матрикс руд сложен агрегатами хлорита и кеммерерита.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе был использован традиционный подход минераграфического изучения рудных минералов. Их химический состав изучался в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным анализатором UltimMax100 (Oxford Instruments). Перед исследованием из каждого образца хромитовой руды (1 образец средневкрапленной полосчатой руды, 2 образца сплошных руд из рудного тела № 9 Центрального месторождения, отобранные в штольне на горизонте 480 м; 1 образец средневкрапленной руды и 2 образца сплошных руд из месторождения № 214, отобранные из разведочной канавы) были изготовлены три плоскопараллельных аншлифа толщиной 4–5 мм. Аншлифы напылялись углеродом (слой углерода имел толщину 25–30 нм). Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока пучка электронов 4.5 нА и времени накопления спектра в точке 60 секунд в режиме Point&ID (2 000 000 импульсов). Диаметр пучка зонда 1–2 мкм. В качестве стандартов для Ru, Os, Ir, Re, Rh, Pt, Ni, Co, Cu, Fe, Mn и Sb были применены чистые металлы, для S – пирит, для As – сперрилит. Использованы аналитические линии: La для Ru, Ir, Re, Rh, Pt, Sb; Ka для S, Fe, Mn, Ni, Co, Cu, As; Ma для Os. Обработка спектров проводилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ.

Все исследования были выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Центр поддержан грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012). Проанализировано более 100 самостоятельных микровключений МПГ.

Полученные результаты подвергались статистической обработке, данные анализов пересчитывались на кристаллохимические формулы.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МПГ В ХРОМОВЫХ РУДАХ МАССИВА

Объектами исследования являлись образцы средневкрапленных и сплошных хромитовых руд из Центрального месторождения (рудное тело № 9) и месторождения № 214. МПГ в этих рудах наблюдаются преимущественно в виде обособленных идиоморфных и гипидиоморфных включений размером до 10 мкм, главным образом, внутри зерен хромшпинелидов, значительно реже — в интерстициях между этими зернами. В средневкрапленных рудах Центрального месторождении были диагностированы лаурит и неназванный интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn с вариациями состава от (Rh,Pt)₄Zn до (Rh,Pt)₂Zn. Минералогия МПГ из сплошных хромитовых руд более разнообразна. МПГ представлены самородным рутенистым никелем, дисульфидами лаурит-эрлихманитового ряда и их мышьяксодержащими разновидностями, купроиридситом и, отмеченным выше, новым интерметаллидом родия.

Средневкрапленные хромовые руды месторождении № 214 в отличие от Центрального месторождения не обнаруживают в своем составе сульфидов ЭПГ и включают только самородные рутений, железистый рутений, осмий, металлические твердые растворы (MTP) Ru-Os специализации с Ni и Fe, неназванный интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn. В сплошных рудах этого месторождения диагностированы самородный рутений и его железистая разновидность, самородные осмий, иридий, платина, лаурит и его мышьяксодержащая разновидность, кашинит, купроиридсит, неназванные фаза Ir,Os(S,As) и интерметаллид (Rh,Pt)₃Zn.

Отмечено, что новый интерметаллид родия $(Rh,Pt)_3Zn$ является самым распространенным и «сквозным» МПГ, найденным во всех изученных образцах обоих месторождений массива Рай-Из.

РАЗНОВИДНОСТИ МПГ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Минералы самородных элементов. Эта группа распространена наиболее широко и представлена самородными рутением, железистым рутением, осмием, иридием, никелем рутенистым, платиной, МТР с никелем и железом, неназванным интерметаллидом родия (Rh,Pt)₃Zn.

Самородный рутений выявлен только в хромитовой руде из месторождения № 214. Он наблюдается в виде неправильных по форме губчатых включений размером до 8 мкм, расположенных внутри катаклазированных зерен хромшпинелидов либо в интерстициях, в непосредственной близости от таких зерен (рис. 4, a-d). В его химическом составе постоянно отмечаются примеси осмия (до 32.5 мас. %), иридия (до 24.0 мас. %), никеля (до 6.6 мас. %) и железа (до 7.0 мас. %), эпизодически – примеси мышьяка (до 2.9 мас. %), сурьмы (до 1.4 мас. %), родия (до 4.8 мас. %), кобальта (до 1.4 мас. %), меди (до 0.5 мас. %) и марганца (до 6.0 мас. %) (табл. 2).

МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ...



Рис. 4. Микровключения самородных элементов и их сульфидов в средневкрапленных (обр. Y-340/7) и сплошных (обр. Y-4/3, обр. Y-325/1) хромитовых рудах месторождения № 214 массива Рай-Из. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

a – неправильное зерно вторичного рутения (ан. 1, табл. 2) на краю зерна хромшпинелида (ан. 15, табл. 1); δ – неправильное включение вторичного рутения (ан. 1, табл. 2) с пористой структурой в зерне хромшпинелида (ан. 15, табл. 1); e – округлое зерно рутения (ан. 12, табл. 2) с губчатой структурой в серпентиновом цементе, замещаемое железистым рутением (ан. 25, табл. 2); e – зерно рутения (ан. 15, табл. 2) в хромшпинелиде, интенсивно замещенное железистым рутением (ан. 22, табл. 2); d – зерно рутения (ан. 18, табл. 2), интенсивно замещенное железистым рутением (ан. 28, табл. 2) и формирующее псевдоморфозу по исходному лауриту; e – зерно железистого рутения (ан. 20, табл. 2) в хромшпинелиде (ан. 16, табл. 1); m-u – идиоморфные включения самородного осмия (ан. 33, 38, 55, табл. 2) в хромшпинелиде (ан. 1, 3, табл. 1), $\kappa-n$ – полифазные включения лаурита (ан. 14, 18, табл. 4), самородного иридия (ан. 46, 48, табл. 2) и купроиридсита (ан. 33, 36, табл. 4) в хромшпинелиде (ан. 51, табл. 1); m – полифазное срастание осмистого лаурита (ан. 25, табл. 4) и самородного иридия (ан. 51, табл. 2) на границе зерна хромшпинелида и серпентина. CrSp – хромшпинелид; Serp – серпентин.

Fig. 4. Microinclusions of minerals of native elements and laurite in moderately disseminated (sample Y-340/7) and massive (sample Y-4/3, sample Y-325/1) chrome ores of deposit No 214, Rai-Iz massif. BSE images.

Табли Table	ща 2. Хи 2. Chem	імический с ical composi	ocrab ition o	MTP f meta	Os–Ir Illic sol	'–Ru c⊓ lid solut	іециал	азации Os—Ir-	(mac. 9 -Ru sys	б) из х tem (w	ромито t %) fro	Bыx py m chrc	д масс) mite ол	ива Ра es of t	ıй-Из, he Rai-	-Iz massif
N [©]	Место- рожде- ние	Образец	Ru	Os	Ir	Rh	Pt	ïz	C	Cu	Fe	Mn	As	ß	Сумма	Формула
									амородн	ый руте	нй					
		Y-4/3-71	80.57	11.19	3.30	-	-	3.82	I	-	0.70	-	1		99.58	$Ru_{0.84}Ni_{0.07}Os_{0.06}Ir_{0.02}Fe_{0.01}$
2		Y-4/3-72	77.15	13.64	4.52	Ι	-	4.06	Ι	Ι	0.22	Ι	Ι	0.44	100.03	${ m Ru}_{0.82}{ m Os}{ m Os}_{0.08}{ m Ni}_{0.07}{ m Ir}_{0.03}$
3		Y-4/3-73	75.86	14.94	3.26	Ι	-	4.35	I	Ι	0.45	Ι	Ι	Ι	98.86	$Ru_{0.81}Os_{0.08}Ni_{0.08}Ir_{0.02}Fe_{0.01}$
4		Y-4/3-57	68.62	2.95	17.19	3.18	I	4.76	I	I	-	Ι	2.85	-	99.55	$Ru_{0.73}Os_{0.02}Ni_{0.09}Ir_{0.09}Rh_{0.03}As_{0.04}$
5		Y-4/3-53	62.67	9.84	21.37	Ι	I	4.44	I	I	0.07	-	1.23	-	99.62	$Ru_{0.71}Os_{0.06}Ni_{0.08}Ir_{0.13}As_{0.02}$
9		Y-4/3-70	63.16	27.05	2.07	I	I	5.74	I	I	0.39	I	I	0.82	99.23	$Ru_{0.70}Os_{0.16}Ni_{0.11}Ir_{0.01}Fe_{0.01}Sb_{0.01}$
7		Y-4/3-58	61.57	11.95	19.51	Ι	I	5.29	I	I	0.30	I	1.39	I	100.00	$Ru_{0.69}Ir_{0.11}Ni_{0.10}Os_{0.07}As_{0.02}Fe_{0.01}$
8		Y-4/3-56	47.47	24.04	18.23	0.73	-	6.56	I	I	I	Ι	0.71	1.12	98.85	$Ru_{0.57}Os_{0.15}Ni_{0.14}Ir_{0.11}Rh_{0.01}As_{0.01}Sb_{0.01}$
6	51C 3V	Y-4/3-54	55.80	20.05	16.54	I	I	6.39	I	I	0.07	I	1.23	I	100.08	$\mathrm{Ru}_{0.63}\mathrm{Ni}_{0.13}\mathrm{Os}_{0.12}\mathrm{Ir}_{0.10}\mathrm{As}_{0.02}$
10	17 JN	Y-4/3-55	57.64	8.47	19.54	4.82	-	5.87	I	I	0.09	I	2.59	0.68	99.68	$Ru_{0.63}Ni_{0.11}Ir_{0.11}Os_{0.05}Rh_{0.05}As_{0.04}Sb_{0.01}$
11		Y-4/3-78	57.73	20.11	12.05	Ι	-	5.50	I	I	3.17	I	I	1.08	99.65	$Ru_{0.64}Os_{0.12}Ni_{0.10}Ir_{0.07}Fe_{0.06}Sb_{0.01}$
12		Y-4/3-77	46.44	28.38	14.60	Ι	Ι	6.21	I	I	2.47	I	I	1.40	99.49	$Ru_{0.54}Os_{0.18}Ni_{0.13}Ir_{0.09}Fe_{0.05}Sb_{0.01}$
13		Y-325/1-236	36.57	32.51	21.41	Ι	Ι	6.08	I	0.46	1.05	I	0.46	0.99	99.52	$\left[Ru_{0.46}Os_{0.22}Ir_{0.14}Ni_{0.13}Fe_{0.02}Cu_{0.01}As_{0.01}Sb_{0.01} \right]$
14		Y-325/1-237	38.71	29.12	22.03	Ι	I	4.74	I	0.53	2.46	I	0.46	0.65	98.70	$Ru_{0.48}Os_{0.19}Ir_{0.14}Ni_{0.10}Fe_{0.06}Cu_{0.01}As_{0.01}Sb_{0.01}$
15		Y-325/1-238	41.46	29.44	20.19	Ι	Ι	4.71	Ι	Ι	3.60	Ι	Ι	0.66	100.05	$Ru_{0.50}Os_{0.19}Ir_{0.13}Ni_{0.09}Fe_{0.08}Sb_{0.01}$
16		Y-340/7-27	36.84	27.66	19.76	Ι	Ι	3.82	1.18	Ι	5.90	4.11	I	Ι	99.28	$Ru_{0.4!}Os_{0.17}Ir_{0.12}Fe_{0.12}Mn_{0.09}Ni_{0.07}Co_{0.02}$
17		Y-340/7-28	36.57	30.51	14.59	Ι	Ι	4.03	1.37	Ι	6.35	5.31	I	Ι	98.72	$Ru_{0.40}Os_{0.18}Fe_{0.13}Mn_{0.11}Ir_{0.08}Ni_{0.08}Co_{0.02}$
18		Y-340/7-29	28.96	28.80	23.96	I	I	4.18	1.11	I	6.98	6.04	I	I	100.03	$Ru_{0.32}Os_{0.17}Ir_{0.14}Fe_{0.14}Mn_{0.13}Ni_{0.08}Co_{0.02}$
								Camopc	дный же	лезисты	й рутений					
19		Y-325/1-16	80.39	3.18	2.69	I	I	1.64	I	I	11.53	I	I	I	99.43	$Ru_{0.75}Fe_{0.19}Os_{0.02}Ni_{0.03}Ir_{0.01}$
20		Y-325/1-17	78.83	3.31	2.52	I	I	2.18	I	I	12.16	I	I	I	99.00	$Ru_{0.73}Fe_{0.21}Ni_{0.03}Os_{0.02}Ir_{0.01}$
21	N⁰ 214	Y-325/1-19	75.17	3.17	2.37	1.25	I	2.99	I	I	13.48	I	1.02	I	99.44	$Ru_{0.68}Fe_{0.22}Ni_{0.05}Os_{0.02}Ir_{0.01}Rh_{0.01}As_{0.01}$
22		Y-325/1-240	54.10	13.83	16.29	I	I	2.11	I	I	13.47	I	I	I	99.80	$Ru_{0.55}Fe_{0.25}Ir_{0.09}Os_{0.07}Ni_{0.04}$
23		Y-325/1-241	59.22	12.76	14.35	I	I	2.28	I	I	10.89	I	I	I	99.51	$Ru_{0.61}Fe_{0.20}Ir_{0.08}Os_{0.07}Ni_{0.04}$

74

ЮРИЧЕВ и др.

Таблиц	a 2 (npodon.	(әпнәж														
№ И	Место- рожде- ние	Образец	Ru	Os	Ir	Rh	Pt	Ni	Co	Cu	Fe	Mn	As	Sb	Сумма	Формула
24		Y-4/3-80	43.50	17.79	13.22	-	I	3.96	I	I	20.80	0.50	I	I	99.77	$Ru_{0.41}Fe_{0.36}Os_{0.09}Ir_{0.07}Ni_{0.06}Mn_{0.01}$
25		Y-4/3-81	51.89	11.72	8.22	-	I	4.53	Ι	I	22.55	0.46	I	Ι	99.38	$Ru_{0.46}Fe_{0.36}Ni_{0.07}Os_{0.06}Ir_{0.04}Mn_{0.01}$
26		Y-4/3-82	61.16	3.75	6.01	-	Ι	3.47	Ι	Ι	24.21	0.96	Ι	Ι	99.56	$Ru_{0.52}Fe_{0.37}Ni_{0.05}Ir_{0.03}Os_{0.02}Mn_{0.01}$
27		Y-325/1-239	62.31	11.80	12.77	-	I	2.86	Ι	I	9.14	Ι	I	I	98.89	$Ru_{0.65}Fe_{0.17}Ir_{0.07}Os_{0.06}Ni_{0.05}$
28		Y-340/7-30	81.54	5.09	2.54	-	Ι	2.03	0.74	I	4.00	3.40	Ι	I	99.35	$Ru_{0.79}Fe_{0.07}Mn_{0.06}Os_{0.03}Ir_{0.01}Ni_{0.03}Co_{0.01}$
29		Y-340/7-31	73.54	6.02	3.91	-	Ι	2.69	0.80	I	5.92	6.40	Ι	I	99.28	$Ru_{0.69}Mn_{0.11}Fe_{0.10}Ni_{0.04}Os_{0.03}Ir_{0.02}Co_{0.01}$
30		Y-340/7-32	77.19	4.13	2.73	Ι	I	2.52	0.82	I	5.85	6.47	I	I	99.72	$Ru_{0.71}Mn_{0.11}Fe_{0.10}Ni_{0.04}Os_{0.02}Ir_{0.01}Co_{0.01}$
31		Y-340/7-33	76.50	3.80	2.60	Ι	I	2.75	0.76	I	6.18	7.01	I	I	99.59	$Ru_{0.70}Mn_{0.12}Fe_{0.10}Ni_{0.04}Os_{0.02}Ir_{0.01}Co_{0.01}$
32		Y-340/7-34	68.39	6.63	4.20	I	I	3.52	0.83	I	7.37	8.66	I	I	99.60	$Ru_{0.62}Mn_{0.14}Fe_{0.12}Ni_{0.06}Os_{0.03}Ir_{0.02}Co_{0.01}$
									Самороді	ный осм	ий					
33		Y-340/7-115	I	87.74	10.93	I	I	I	1	I	0.05	I	I	I	98.72	OS _{0.89} Ir _{0.11}
34		Y-340/7-116	I	88.58	10.84	I	I	I	I	I	I	I	I	I	99.42	$Os_{0.89}Ir_{0.11}$
35		Y-340/7-117	I	87.94	10.90	I	I	I	I	I	0.04	I	I	I	98.88	$Os_{0.89}Ir_{0.11}$
36		Y-325/1-182	2.57	58.16	38.40	I	I	I	I	I	0.07	I	I	I	99.21	$Os_{0.57} Ir_{0.38} Ru_{0.05}$
37		Y-325/1-183	2.60	58.07	38.30	I	I	I	1	I	0.03	I	I	I	99.00	$Os_{0.58} Ir_{0.37} Ru_{0.05}$
38	210 SM	Y-325/1-185	2.81	55.54	41.11	I	I	I	1	I	0.02	I	I	I	99.48	${\rm Os}_{0.55}{ m Ir}_{0.40}{ m Ru}_{0.05}$
39	412 2N	Y-325/1-53	2.76	55.08	41.14	-	I	Ι	Ι	I	I	Ι	I	Ι	98.99	${ m Os}_{0.55}{ m Ir}_{0.40}{ m Ru}_{0.05}$
40		Y-325/1-54	3.08	55.14	41.63	-	Ι	Ι	Ι	Ι	I	Ι	Ι	Ι	99.84	$Os_{0.54} Ir_{0.40} Ru_{0.06}$
41		Y-325/1-55	3.18	53.87	41.85	-	Ι	Ι	Ι	I	I	Ι	Ι	Ι	98.89	${ m Os}_{0.53}{ m Ir}_{0.41}{ m Ru}_{0.06}$
42		Y-325/1-56	2.13	54.84	42.74	-	Ι	Ι	Ι	I	I	Ι	Ι	Ι	99.71	$Os_{0.54}Ir_{0.42}Ru_{0.04}$
43		Y-340/7-133	I	55.50	44.51	I	I	I	I	I	I	I	I	I	100.01	$Os_{0.56} Ir_{0.44}$
44		Y-340/7-134	Ι	55.14	44.34	Ι	Ι	Ι	Ι	I	I	I	Ι	Ι	99.48	${\rm OS}_{0.56}{ m Ir}_{0.44}$
								Ŭ	Самородн	иди йы	ий					
45		Y-325/1-57	I	17.21	82.03	I	I	I	I	I	0.12	I	I	I	99.37	$\mathrm{Ir}_{0.82}\mathrm{Os}_{0.18}$
46	N6 214	Y-325/1-58	I	16.76	82.12	I	I	I	I	I	0.09	I	I	I	98.97	${ m Ir}_{0.83}{ m Os}_{0.17}$
47	+17 M	Y-325/1-59	I	17.19	81.35	I	I	I	I	I	0.16	I	I	I	98.70	$1r_{0.82}Os_{0.17}Fe_{0.01}$
48		Y-325/1-95	I	19.25	78.31	0.81	1.33	I	I	Ι	I	I	I	I	17.66	$\mathrm{Ir}_{0.78}\mathrm{Os}_{0.19}\mathrm{Rh}_{0.02}\mathrm{Pt}_{0.01}$

МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ...

75

№ п/п	Место- рожде- ние	Образец	Ru	Os	Ir	Rh	Pt	iZ	Co	Cu	Fe	Mn	As	Sb	Сумма	Формула
49		Y-325/1-96	Ι	19.23	77.91	0.80	1.73	Ι	Ι	Ι	0.01	I	I	Ι	99.68	${\rm Ir}_{0.77}{\rm Os}_{0.19}{\rm Rh}_{0.02}{\rm Pt}_{0.02}$
50		Y-325/1-97	Ι	19.27	76.66	0.81	2.49	Ι	Ι	Ι	Ι	Ι	Ι	Ι	99.22	${ m Ir}_{0.77}{ m Os}_{0.19}{ m Rh}_{0.02}{ m Pt}_{0.02}$
51		Y-325/1-107	Ι	30.42	69.06	Ι	Ι	I	I	Ι	0.02	I	I	Ι	99.49	$\mathrm{Ir}_{0.69}\mathrm{Os}_{0.31}$
52		Y-325/1-108	Ι	30.61	69.57	Ι	Ι	I	I	I	Ι	I	I	Ι	100.18	$\mathrm{Ir}_{0.69}\mathrm{Os}_{0.31}$
53		Y-325/1-109	Ι	30.73	68.53	Ι	I	Ι	I	I	Ι	I	I	Ι	99.26	$\mathrm{Ir}_{0.69}\mathrm{Os}_{0.31}$
54		Y-325/1-26	2.54	29.08	65.92	0.54	2.04	Ι	I	I	0.04	I	I	Ι	100.14	$Ir_{0.64}Os_{0.28}Ru_{0.05}Rh_{0.01}Pt_{0.02}$
55		Y-325/1-27	2.91	30.59	63.46	0.74	1.63	Ι	I	I	Ι	I	I	I	99.34	$Ir_{0,62}Os_{0,30}Ru_{0,05}Rh_{0,01}Pt_{0,02}$
56		Y-325/1-30	3.29	32.13	62.48	0.76	Ι	Ι	I	I	Ι	I	I	I	98.66	$\mathrm{Ir}_{0.61}\mathrm{Os}_{0.32}\mathrm{Ru}_{0.06}\mathrm{Rh}_{0.01}$
57		Y-325/1-31	2.96	31.65	62.10	0.86	1.62	Ι	I	I	0.04	I	I	Ι	99.24	$Ir_{0,60}Os_{0,31}Ru_{0,05}Rh_{0,02}Pt_{0,02}$
						С	амородн	ый никел	пь рутени	істый (р	утенисто	-иридис	тый)			
58	Цен-	P-2-80	25.57	Ι	Ι	Ι	Ι	74.50	Ι	Ι	Ι	Ι	I	Ι	100.07	$Ni_{0.83}Ru_{0.17}$
59	тральное	P-2-79	9.27	Ι	14.59	I	I	75.53	I	Ι	0.75	I	I	I	100.14	$Ni_{0.88}Ru_{0.06}Ir_{0.05}Fe_{0.01}$
								LΜ	Р с нике	лем и же	MOEBIC					
60		Y-340/7-174	33.03	33.94	2.24	Ι	Ι	19.96	Ι	Ι	9.52	Ι	I	Ι	98.70	$Ni_{0,33}Ru_{0,32}Fe_{0,17}Os_{0,17}Ir_{0,01}$
61		Y-340/7-176	32.85	36.00	3.41	Ι	Ι	17.78	Ι	Ι	8.85	I	Ι	Ι	98.89	$Ru_{0,33}Ni_{0,30}Os_{0,19}Fe_{0.16}Ir_{0.02}$
62	N6 214	Y-340/7-177	35.78	35.58	3.78	Ι	Ι	16.26	Ι	Ι	8.28	Ι	Ι	Ι	99.68	$Ru_{0.36}Ni_{0.28}Os_{0.19}Fe_{0.15}Ir_{0.02}$
63	+17 Ar	Y-340/7-178	38.56	33.45	3.81	Ι	Ι	16.17	Ι	Ι	7.40	Ι	Ι	Ι	99.38	${ m Ru}_{0.39}{ m Ni}_{0.28}{ m Os}_{0.18}{ m Fe}_{0.13}{ m Ir}_{0.02}$
64		Y-340/7-173	22.64	18.82	I	Ι	I	48.66	0.42	1.31	6.35	I	0.51	Ι	98.70	$Ni_{0.64}Ru_{0.17}Fe_{0.09}Os_{0.08}Cu_{0.01}Co_{0.01}$
65		Y-340/7-175	19.76	18.01	I	I	I	51.79	0.38	1.42	7.45	Т	0.48	I	99.29	$Ni_{0.66}Ru_{0.15}Fe_{0.10}Os_{0.07}Cu_{0.02}$

(окончание)	
2	
Таблица	

76

ЮРИЧЕВ и др.

Разновидность самородного рутения с повышенным содержанием железа (до 24.2 мас. %) отнесена авторами к самородному железистому рутению. Последний характеризуется меньшими содержаниями осмия (до 17.8 мас. %), иридия (до 16.3 мас. %) и никеля (до 4.5 мас. %), отсутствием примеси мышьяка и сурьмы (табл. 2). Он развивается по зернам самородного рутения в виде губчатых, преимущественно дезинтегрированных на ряд сегментов выделений (рис. 4, e-e).

Самородный осмий, также как и самородный рутений, диагностирован только в хромитовой руде из месторождения № 214. Он отмечен в виде идиоморфных шестиугольных зерен размером до 6 мкм внутри зерен хромшпинелидов (рис. 4, m-u). В составе минерала постоянно отмечается примесь иридия (до 44.5 мас. %), иногда – примеси рутения (до 3.2 мас. %) и железа (до 0.1 мас. %) (табл. 2).

Самородный иридий обнаружен внутри зерен хромшпинелидов только в сплошных рудах месторождения № 214. Он образует кубические зерна с высокой степенью идиоморфизма размером до 5 мкм, ассоциирующие с выделениями лаурита, купроиридсита и неназванной фазы Ir,Os(S,As) (рис. 4, κ -*м*; рис. 5, *a*). В химическом составе минерала постоянно отмечается примесь осмия (до 32.1 мас. %), реже – незначительные примеси родия (до 0.9 мас. %), платины (до 2.5 мас. %), железа (до 0.2 мас. %) и рутения (до 3.3 мас. %) (табл. 2).

Самородный никель рутенистый (содержание Ru до 25.6 мас. %) распространен ограничено, выявлен только в сплошных хромовых рудах месторождения Центральное. Он образует очень мелкие (размером до 1 мкм) гипидиоморфные включения в халькозине, который, в свою очередь, включен в зерна хромшпинелида (рис. 5, δ ; табл. 2).

Самородная платина распространена крайне ограничено. Она выявлена единожды в сплошной руде месторождения \mathbb{N} 214 в виде неправильного дендритоподобного включения размером около 6 мкм (рис. 5, e). Из примесей в составе минерала обнаружено только железо (до 2.0 мас. %).

MTP (Ru,Ni,Os,Fe) распространены ограничено, выявлены только в средневкрапленных хромовых рудах месторождения \mathbb{N} 214 в виде гипидиоморфных включений размером до 8 мкм внутри зерен хромшпинелидов (рис. 5, *в*). В химическом составе минералов наряду с тугоплавкой триадой постоянно отмечаются примеси никеля (до 51.8 мас. %) и железа (до 9.5 мас. %), иногда – примеси кобальта (до 0.4 мас. %), меди (до 1.4 мас. %) и мышьяка (до 0.5 мас. %) (табл. 2).

Неназванный интерметаллид родия $(Rh,Pt)_3Zn$ с вариациями состава от $(Rh,Pt)_4Zn$ до $(Rh,Pt)_2Zn$, как отмечалось выше, является самым распространенным и «сквозным» МПГ, выявленным во всех изученных образцах руды обоих месторождений. Минерал наблюдается как в виде включений в зернах хромшпинелидов (каверны, брекчированные участки), так и в интерстициях между ними. Он образует гипидиоморфные зерна размером до 10 мкм, со своеобразной полосчатой, пористой поверхностью (рис. 5, $\partial - M$). В состав минерала входят примеси железа (до 2.5 мас. %), меди (до 0.3 мас. %) и никеля (до 0.3 мас. %) (табл. 3).

Сульфиды ЭПГ. Их распространены ограничено по сравнению с первой группой. Они представлены обычной для хромитовых руд ассоциацией дисульфидов ряда лаурит (RuS_2) — эрлихманит (OsS_2) и, реже, кашинитом (Ir,Rh)₂S₃ и купроиридситом $CuIr_2S_4$.

Минералы ряда лаурит—эрлихманит отмечены во всех образцах изученных хромитовых руд за исключением средневкрапленных руд месторождения № 214. Отдельные зерна достигают размера 10 мкм и часто характеризуются высокой степенью идиоморфизма с хорошо выраженными гранями. Они наблюдаются, главным образом, в виде включений в зернах хромшпинелидов, иногда в тесной ассоциации с самородным иридием и купроиридситом (рис. 4, κ –m; рис. 6, a–r).

ЮРИЧЕВ и др.



Рис. 5. Микровключения минералов самородных элементов и их сплавов в средневкрапленных (обр. Р-1) и сплошных (обр. Р-2) хромовых рудах Центрального месторождения, в средневкрапленных (обр. Ү-340/7) и сплошных (обр. Ү-325/1) хромовых рудах месторождения № 214, массив Рай-Из. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

a – замещение неназванным сульфоарсенидом Me (S,As) (ан. 9, табл. 5) самородного иридия (ан. 55, табл. 2) в трещинке зерна хромшпинелида (ан. 4, табл. 1); δ – включения лаурита (ан. 7, табл. 4) и рутенистого никеля (ан. 58, табл. 2) в халькозине на границе зерна хромшпинелида (ан. 29, табл. 1); δ – псевдоморфоза MTP (Ru,Ni,Os,Fe) (ан. 60, табл. 2) по осмистому лауриту; e – дендритоподобное включение платины (химический состав приведен в тексте) в зерне хромшпинелида (ан. 18, табл. 1); ∂ – m – включения неназванного интреметаллида родия (Rh,Pt)₃Zn (ан. 1, 3, 5, 8, 10, 18, 25, 33, табл. 3 соответственно) в хромшпинелиде (ан. 21–24, табл. 1) и серпентиновом цементе. Chl – халькозин; Ol – оливин.

Fig. 5. Microinclusions of minerals of native elements and their alloys in moderately disseminated (sample R-1) and massive (sample R-2) chrome ores of the Central deposit, in moderately disseminated (sample Y-340/7) and massive (sample Y-325/1) chrome ores of deposit \mathbb{N} 214, Rai-Iz massif. BSE images.

Table 3.	Chemical	composition	of new	rhodium	intermetallic	compound	(Rh,Pt) ₃ Zn	(wt %)	from
chromit	e ores of th	e Rai-Iz mass	if						

№ п/п	Место- рождение	Образец	Rh	Zn	Pt	Ni	Cu	Fe	Сумма	Формула
1		P-1-167	78.89	15.16	5.80	_	0.22	-	100.07	Rh _{0.74} Zn _{0.23} Pt _{0.03}
2		P-1-168	84.45	13.30	1.86	_	0.16	-	99.77	Rh _{0.79} Zn _{0.20} Pt _{0.01}
3		P-1-173	79.34	18.32	2.52	_	-	-	100.18	Rh _{0.73} Zn _{0.26} Pt _{0.01}
4		P-1-176	70.55	16.69	12.82	_	-	-	100.06	Rh _{0.68} Zn _{0.25} Pt _{0.07}
5		P-2-124	67.79	17.01	14.48	_	-	0.02	99.3	Rh _{0.66} Zn _{0.26} Pt _{0.08}
6		P-2-122	67.61	17.27	15.09	_	-	0.08	100.06	Rh _{0.66} Zn _{0.26} Pt _{0.08}
7	ЭОН	P-2-143	74.61	22.31	1.80	_	-	-	98.72	Rh _{0.67} Zn _{0.32} Pt _{0.01}
8	alibi	P-2-146	75.73	22.29	2.02	_	-	-	100.03	Rh _{0.68} Zn _{0.31} Pt _{0.01}
9	du	P-2-203	69.08	20.43	9.99	-	-	-	99.5	Rh _{0.65} Zn _{0.30} Pt _{0.05}
10	Пел	P-2-205	67.66	20.93	10.35	-	-	-	98.94	Rh _{0.64} Zn _{0.31} Pt _{0.05}
11		P-2-208	79.32	18.93	1.28	_	-	-	99.53	Rh _{0.72} Zn _{0.27} Pt _{0.01}
12		P-4-46	84.71	12.03	2.26	_	-	-	98.99	Rh _{0.81} Zn _{0.18} Pt _{0.01}
13		P-4-49	87.08	10.52	2.51	_	-	-	100.1	Rh _{0.83} Zn _{0.16} Pt _{0.01}
14		P-4-56	66.50	20.89	12.30	_	_	_	99.69	Rh _{0.63} Zn _{0.31} Pt _{0.06}
15		P-4-57	62.05	22.55	14.99	_	-	-	99.59	Rh _{0.59} Zn _{0.34} Pt _{0.07}
16	1	P-4-59	65.47	22.69	11.27	_	-	-	99.43	Rh _{0.61} Zn _{0.33} Pt _{0.06}
17		Y-4/3-13	78.55	17.68	3.05	_	-	-	99.28	Rh _{0.73} Zn _{0.26} Pt _{0.01}
18]	Y-4/3-62	77.40	15.04	6.53	_	-	-	98.98	Rh _{0.74} Zn _{0.23} Pt _{0.03}
19		Y-325/1-41	77.16	11.22	11.39	_	-	-	99.76	Rh _{0.76} Zn _{0.18} Pt _{0.06}
20		Y-325/1-44	80.61	14.60	4.21	-	-	-	99.42	Rh _{0.76} Zn _{0.22} Pt _{0.02}
21		Y-325/1-46	75.29	15.21	8.23	-	-	-	98.73	Rh _{0.73} Zn _{0.23} Pt _{0.04}
22		Y-325/1-189	77.03	16.74	6.42	_	-	-	100.19	Rh _{0.72} Zn _{0.25} Pt _{0.03}
23		Y-340/7-70	71.33	14.48	13.02	_	-	-	98.83	Rh _{0.71} Zn _{0.22} Pt _{0.07}
24	4	Y-340/7-71	77.23	13.18	9.36	_	-	-	99.77	Rh _{0.75} Zn _{0.20} Pt _{0.05}
25	ē 21	Y-340/7-159	65.58	17.42	15.70	_	-	-	98.69	Rh _{0.65} Zn _{0.27} Pt _{0.08}
26		Y-399/2-6	81.35	12.87	5.66	-	-	-	99.88	Rh _{0.78} Zn _{0.19} Pt _{0.03}
27	1	Y-399/2-17	77.39	11.49	10.95	_	-	-	99.83	Rh _{0.76} Zn _{0.18} Pt _{0.06}
28		Y-340/7-96	65.31	21.20	12.78	0.26	-	-	99.56	Rh _{0.62} Zn _{0.31} Pt _{0.06} Ni _{0.01}
29		Y-340/7-98	68.07	20.29	10.84	0.26	-	-	99.47	Rh _{0.64} Zn _{0.30} Pt _{0.05} Ni _{0.01}
30		Y-325/1-90	72.22	17.69	9.85	_	0.31	-	100.07	Rh _{0.68} Zn _{0.26} Pt _{0.05} Cu _{0.01}
31		Y-325/1-92	74.10	16.88	8.17	_	0.28	-	99.43	Rh _{0.70} Zn _{0.25} Pt _{0.04} Cu _{0.01}
32		Y-325/1-142	82.56	14.04	1.75	_	-	1.49	99.84	Rh _{0.76} Zn _{0.20} Fe _{0.03} Pt _{0.01}
33		Y-325/1-144	81.69	12.57	2.09	_	_	2.52	98.86	Rh _{0.76} Zn _{0.19} Fe _{0.04} Pt _{0.01}

Дисульфиды образуют практически непрерывный изоморфный ряд. При этом если в средневкрапленных рудах Центрального месторождения лаурит представлен почти чистой рутениевой разновидностью (табл. 4, ан. 1–3) и переходными фазами (табл. 4, ан. 4–6), то в сплошных хромитовых рудах отмечены промежуточные разновидности (табл. 4, ан. 7–11) и чисто осмиевый конечный член изоморфного ряда – эрлихманит (табл. 4, ан. 12–13). В качестве непостоянной

les of PGE (wt $\%$) from chromite ores of the Rai-Iz massif	Os Ir Rh Pt Ni Cu S Cymaa Формула	Дисульфиды ряда лаурит (RuS ₂) – эрлихманит (OsS ₂)	$ 0.30$ $ 38.53$ 98.60 $(Ru_{0.98}Ni_{0.01})_{0.99}S_{2.01}$	$ 38.48$ 99.22 $Ru_{1.00}S_{2.00}$	$ 0.24 - 38.50 99.76 (Ru_{1.00}Ni_{0.01})_{1.01}S_{1.99} $	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$9.26 5.50 - - - - 34.57 98.85 (Ru_{0.73}O_{8,19}Ir_{0.05})_{0.97}S_{2.03}$	3.84 5.25 34.99 99.36 $(Ru_{0.73}Os_{0.18}Ir_{0.05})_{0.96}S_{2.04}$	$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	3.35 8.89 0.53 - 33.10 100.30 (Ru _{0.75} Os _{0.19} Ir _{0.09} Ni _{0.02}) $_{1.05}S_{1.95}$	$.20$ 4.08 $ 37.62$ 98.95 $(Ru_{0.89}Os_{0.04}Ir_{0.04})_{0.97}S_{2.03}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$.66$ 4.92 $ 37.99$ 99.51 $(Ru_{0.87}Os_{0.04}Ir_{0.04})_{0.95}S_{2.05}$	$0.64 13.33 - - - - - 25.37 99.34 (O_{8_{0.81}} Ir_{0.17})_{0.98} S_{2.02}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$4.03 10.06 34.09 99.33 (Ru_{0.76}Os_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{2.00} (Ru_{0.76}Os_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{2.00} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{2.00} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{0.10} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.10})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14}S_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.00}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.01}S_{0.14} (Ru_{0.76}S_{0.14}Ir_{0.14}Ir_{0.14})_{1.01}S_{0.14} (Ru_{0.76}$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3.90 9.80 $ 33.85$ 99.06 $(Ru_{0.78}Os_{0.14}Ir_{0.09})_{1.01}S_{1.99}$	$7.09 10.21 - - - 33.76 100.04 (Ru_{0.73}Os_{0.17}Ir_{0.10})_{1.00}S_{2.00} (Ru_{0.73}Os_{0.17}Ir_{0.10})_{1.00}S_{2.00} $	$6.83 9.66 - - - - - 33.30 98.95 (Ru_{0.75}O_{8.17}Ir_{0.09})_{1.01}S_{1.99}$	$6.35 9.55 33.08 98.75 $ $(Ru_{0.76}O_{8.17}Ir_{0.09})_{102}S_{1.98}$	$1.32 11.44 - - - 34.61 98.94 (Ru_{0.76}Os_{0.11} Ir_{0.11})_{0.98} S_{2.02} 0.11.44 - - - - - - - - - $	$1.30 11.16 - - - 34.46 98.98 (Ru_{0.77}O_{80.11}Ir_{0.11})_{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11}Ir_{0.11})_{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11}Ir_{0.11} _{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11}Ir_{0.77}O_{80.11} _{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11}Ir_{0.77}O_{80.11} _{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11} _{0.99} Ru_{0.77}O_{80.11} _{0.99}S_{2.01} Ru_{0.77}O_{80.11} _{0.99}S_{2.01} _{0.99}S_{2.01} _{0.99}S_$	$[.44 \ 11.26 \ - \ - \ - \ - \ 34.74 \ 99.86 \ (Ru_{5.7}O_{5.01} Ir_{0.1})_{a.06}S_{a.01}$
%) from chr	Rh Pt	фиды ряда								1				1	1			-						
of PGE (wt	L L	Дисулн	1	1	1	5.40	5.50	5.25	8.14	8.89	4.08	4.24	4.92	13.33	14.08	10.06	9.74	9.80	10.21	99.66	9.55	11.44	11.16	11.26
ulfides c	Os		1		1	19.30	19.26	18.84	16.00	18.35	4.20	4.49	4.66	60.64	60.01	14.03	14.31	13.90	17.09	16.83	16.35	11.32	11.30	11.44
on of si	Ru		59.77	60.74	61.02	40.06	39.53	40.28	41.05	39.42	53.05	53.06	51.94	1	1	41.16	41.23	41.51	38.98	39.15	39.77	41.57	42.06	42.42
ical compositi	Образец		P-1-96	P-1-97	P-1-98	P-1-154	P-1-155	P-1-156	P-2-75	P-2-76	P-2-167	P-2-168	P-2-169	P-4-33	P-4-34	Y-325/1-63	Y-325/1-64	Y-325/1-65	Y-325/1-100	Y-325/1-101	Y-325/1-102	Y-325/1-155	Y-325/1-156	Y-325/1-157
I. Chemi	Ме- сто- рож- дение							Пен-	траль-	ное										10.57	_ 717 5V			
Table 4	Л <u>е</u> Л		-	2	e	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Таблица 4. Химический состав сульфидов ЭПГ (мас. %) из хромитовых руд массива Рай-Из

80

ЮРИЧЕВ и др.

	Формула	$(Ru_{0,43}Os_{0,43}Ir_{0,13})_{0.99}S_{2.01}$	$(Ru_{0,43}Os_{0,42}Ir_{0,12})_{0.97}S_{2.03}$	$(Ru_{0,43}Os_{0,42}Ir_{0,12})_{0.97}S_{2.03}$		$(\mathrm{Ir}_{1.89}\mathrm{Rh}_{0.13})_{2.02}\mathrm{S}_{2.98}$	$(\mathrm{Ir}_{1.85}\mathrm{Rh}_{0.15})_{2.00}\mathrm{S}_{3.00}$	$(\mathrm{Ir}_{1.86}\mathrm{Rh}_{0.15})_{2.01}\mathrm{S}_{2.99}$		$Cu_{0.97}Ir_{2.08}S_{3.95}$	$Cu_{0.97}Ir_{2.11}S_{3.92}$	$Cu_{0.96}Ir_{2.10}S_{3.94}$	$Cu_{0.89}(Ir_{1.61}Rh_{0.17}Ru_{0.16}Pt_{0.07}Os_{0.05}Ni_{0.04})_{2.10}S_{4.01}$	$\begin{array}{ c c c } Cu_{0.91}(Ir_{1,61}Rh_{0.15}Ru_{0.12}Os_{0.07}Pt_{0.05}Ni_{0.04})_{2.04}S_{4.05} \\ \end{array}$	$\begin{array}{ c c c } Cu_{0.85}(Ir_{1.56}Rh_{0.16}Ru_{0.17}Pt_{0.08}Os_{0.06}Ni_{0.04})_{2.07}S_{4.08} \\ \end{array}$	$Cu_{0,91}(Ir_{1.57}Rh_{0.21}Pt_{0.19}Ru_{0.13}Os_{0.05})_{2.15}S_{3.94}$	$Cu_{0,s_2}(Ir_{1,43}Ru_{0,28}Rh_{0,19}Pt_{0,15}Os_{0,12})_{2,17}S_{4,01}$
	Сумма	98.73	99.43	100.17		99.56	100.19	99.40		99.49	99.75	99.47	99.38	100.02	99.26	98.78	100.03
	S	29.73	30.17	30.45	$h_{1,2}S_{3}$	20.23	20.61	20.37	Mr_2S_4	21.61	21.46	21.49	23.02	23.32	23.41	22.23	23.11
	Cu	I	I	I	T (Ir,R)	I	I	I	дсит С	10.34	10.32	10.24	10.18	10.48	9.88	10.05	9.38
	Ni	I	I	I	ашини	I		I	идиодп	Ι	I	I	0.39	0.44	0.42	I	I
	Pt	I	I	I	X	I	-	I	Kyı	Ι	Ι	I	2.45	1.87	2.68	6.60	5.16
	Rh	I	I	I		2.89	3.37	3.29		I	I	I	3.06	2.89	2.96	3.69	3.44
	Ir	11.26	11.04	11.03		76.44	76.20	75.74		67.55	67.97	67.74	55.52	54.39	54.83	52.16	49.57
	Os	37.68	37.97	38.19		I	I	I		Ι	I	I	1.89	2.36	2.00	1.67	4.18
	Ru	20.06	20.24	20.51		I	I	I		Ι	I	I	2.87	2.27	3.09	2.39	5.20
(ənh	Образец	Y-325/1-110	Y-325/1-111	Y-325/1-112		Y-325/1-124	Y-325/1-125	Y-325/1-126		P-4-35	P-4-36	P-4-37	Y-325/1-60	Y-325/1-61	Y-325/1-62	Y-325/1-98	Y-325/1-99
4 (оконча)	Ме- сто- рож- дение						Nº 214			Цен-	траль-	ное			Nº 214		
Таблица	л≦ М	24	25	26		27	28	29		30	31	32	33	34	35	36	37

МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ...

ЮРИЧЕВ и др.



Рис. 6. Микрофотографии акцессорных сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ в средневкрапленных (обр. Р-1) и сплошных (обр. Р-2, обр. Р-4) хромовых рудах Центрального месторождения и в сплошных (обр. Y-325/1) хромовых рудах месторождения № 214, массив Рай-Из. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

a-e – идиоморфные включения лаурита (ан. 2, 4, 20, табл. 4 соответственно) в хромшпинелиде (ан. 9–10, табл. 1); e – включения купроиридсита (ан. 30, табл. 4) и эрликманита (ан. 12, табл. 4) в каверне хромшпинелида (ан. 12, табл. 1), «залеченной» серпентином; ∂ – идиоморфное зерно кашинита (ан. 27, табл. 4) в хромшпинелиде (ан. 13, табл. 1); e – включение мышьяксодержащего лаурита (ан. 1, табл. 5) в хромшпинелиде. Изображения в режиме обратно-рассеянных электронов.

Fig. 6. Microphotographs of accessory sulfides and sulfoarsenides of PGE in moderately disseminated (sample R-1) and massive (sample R-2, sample R-4) chrome ores of the Central deposit and in massive (sample Y-325/1) chrome ores of the deposit No 214, Rai-Iz massif. BSE images.

изоморфной примеси в химическом составе дисульфидов присутствует никель (до 0.5 мас. %).

В сплошных хромитовых рудах месторождения № 214 выявлены только переходные формы лаурита с содержанием осмия от 11.3 до 38.2 мас. % и иридия от 9.6 до 11.4 мас. %. (табл. 4, анализы 14–26).

Кашинит распространен ограничено, отмечен только в сплошных рудах месторождения \mathbb{N} 214, где он формирует обособленные идиоморфные включения размером до 7 мкм в зернах хромшпинелидов (рис. 6, ∂ ; табл. 4).

Купроиридсит также характеризуется ограниченным распространением. Он диагностирован только в сплошных хромитовых рудах обоих месторождений в виде гипидиоморфных включений размером до 4 мкм в зернах хромшпинелидов в тесной ассоциации с самородным иридием и лауритом или эрлихманитом (рис. 4, *к*, *л*; рис. 6, *г*). Химический состав купроиридсита Центрального месторождения характеризуется абсолютной «стерильностью» в отношении других металлов. Однако данный минерал в месторождении № 214 обнаруживает постоянную незначительные примеси рутения (до 5.2 мас. %), осмия (до 4.2 мас. %), родия (до 3.7 мас. %), платины (до 6.6 мас. %) и никеля (до 0.4 мас. %) (табл. 4).

Сульфоарсениды ЭПГ. Распространены ограниченно в изученных образцах из обоих месторождений. Данная группа по результатам рентгеноспектрального анализа подразделяется на два типа соединений: мышьяксодержащие дисульфиды и неназванную фазу Ir,Os(S,As).

Первый тип по главным компонентам и их атомным количествам идентичен дисульфидам лаурит-эрлихманитового ряда. Главная особенность минералов этой подгруппы заключается в том, что в лигандной группировке часть серы замещена мышьяком (содержание As до 4.2 мас. %) и, таким образом, эта подгруппа является переходной к достаточно распространенным сульфоарсенидным фазам. Также в составе этих минералов возрастает роль иридия (до 29.6 мас. %), а в отдельных зернах обнаруживается примесь родия (до 4.2 мас. %) (табл. 5).

Мышьяксодержащие дисульфиды наблюдаются в виде гипидиоморфных и округлых включений размером до 3 мкм, заключенных внутри зерен хромшпинелидов или халькозина (рис. 6, *e*). Ранее подобные минералы описывались в хромитовых рудах Кемпирсайского (Южный Урал), Алапаевского (Средний Урал), Верх-Нейвинского (Средний Урал), Харчерузского (Полярный Урал) и Агардагского (республика Тыва) ультрамафитовых массивов (Мурзин, Суставов, 2000; Дистлер и др., 2003; Юричев и др., 2020; Юричев, 2022; Yurichev et al., 2021; Мурзин и др., 2023).

Сульфоарсениды состава Ir,Os(S,As), где в катионной группе доминирует иридий (до 56.6 мас. %), а также постоянно присутствуют осмий (до 17.2 мас. %), рутений (до 1.6 мас. %) и родий (до 1.9 мас. %), встречены в виде единичных микроскопических включений (размером до 1 мкм) в зернах хромшпинелидов из сплошных руд месторождения № 214, нередко в ассоциации с самородным иридием (рис. 5, *a*; табл. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В разномасштабных хромититовых проявлениях в альпинотипных ультрамафитах различных регионов мира практически всегда присутствует акцессорные МПГ. Это доказывает существование общих условий концентрирования и кристаллизации этих минералов и хромшпинелидов. В настоящее время такая пространственная и генетическая связь является общепризнанной (Талхаммер, 1996; Zhou et al, 1996; Melcher et al, 1997 и др.).

Хромитообразование неразрывно связано с процессом частичного плавления мантийного субстрата, минералогически и геохимически близкого к лерцолиту (Савельева, 1987). Частичное плавление мантийного вещества при адиабатической декомпрессии ведет к образованию базальтовой выплавки и комплементарного ей тугоплавкого остатка (Mysen, Kushiro, 1977). В экспериментах по плавлению лерцолитов установлено, что наиболее легкоплавкими фазами в них являются клинопироксен и глиноземистая шпинель, затем в расплав переходят ромбические пироксены, наиболее тугоплавким компонентом является оливин (Шинкарёв, Иваников, 1983). В результате плавления образуется «базальтовая» (расплав) и «оливиновая» (рестит) составляющие. В базальтовом расплаве преимущественно концентрируются щелочи, алюминий, кальций, титан, большая часть железа, а в рестите – тугоплавкие компоненты, в первую очередь магний и никель, а также хром и ЭПГ. При этом для хрома более свойственно накапливаться в тугоплавком остатке в виде собственной минеральной фазы — хромшпинелида, причем содержание последнего будет расти одновременно с ростом степени деплетированности субстрата. Вероятно, при этом также будет расти хромистость рестита за счет выноса глинозема в составе базальтовой выплавки. Подобная закономерность (увеличение хромистости по

Table	5. Chen	nical compositi	ion of ar	rsenic-c	ontainiı	ng disı	ulfide	s and	sulfo	arseni	ides of F	PGE (wi	t. %) fr	om chron	nite ores of the Rai-Iz massif
№ П/П	Ме- сто- рож- дение	Образец	Ru	Os	lr	Rh	Pt	ïZ	Cu	Fe	S	As	Sb	Сумма	Формула
					Мышыя	ксоде	ржа	шие д	исул	рфидн	ы ряда ј	паурит	иrd€ –	хманит	
-		P-2-134	46.77	9.29	6.48	Ι	I	I	Ι	I	35.89	1.09	I	99.51	$(Ru_{0.82}Os_{0.09}Ir_{0.06})_{0.97}(S_{2.00}As_{0.03})_{2.03}$
2	Пен-	P-2-135	47.05	9.39	6.28		Ι	I	Ι	I	35.82	1.31	I	99.85	$(Ru_{0.82}Os_{0.09}Ir_{0.06})_{0.97}(S_{2.00}As_{0.03})_{2.03}$
3	траль-	P-2-136	46.26	9.23	7.18	Ι	Ι	Ι	Ι	I	35.35	1.27	I	99.30	$(Ru_{0.82}Os_{0.09}Ir_{0.07})_{0.98}(S_{1.99}As_{0.03})_{2.02}$
4	ное	P-4-132	Ι	60.09	3.72	Ι	Ι	4.24	Ι	0.17	28.30	1.61	Ι	98.12	$(Os_{0.70}Ni_{0.16}Ir_{0.04}Fe_{0.01})_{0.91}(S_{2.04}As_{0.05})_{2.09}$
5		P-4-133		60.05	2.96	Ι		5.47	Ι	0.21	28.71	1.58	Ι	98.98	$(Os_{0,69}Ni_{0,20}Ir_{0,03}Fe_{0,01})_{0,93}(S_{2,02}As_{0,05})_{2,07}$
9		Y-325/1-205	19.09	16.72	29.59	4.15	Ι	Ι	Ι	I	26.35	4.00	I	99.90	$(Ru_{0,43}Ir_{0,35}Os_{0,20}Rh_{0,09})_{1,07}(S_{1,81}As_{0,12})_{1,93}$
7	Nº 214	Y-325/1-207	19.10	22.86	25.20	2.22		Ι	Ι		25.90	4.19	Ι	99.46	$(Ru_{0.44}Ir_{0.30}Os_{0.28}Rh_{0.05})_{1.07}(S_{1.80}As_{0.13})_{1.93}$
8		Y-325/1-208	16.59	24.44	28.10	2.28	Ι	Ι	Ι	Ι	26.18	2.47	Ι	100.06	$(Ru_{0,39}Ir_{0,34}Os_{0,30}Rh_{0,05})_{1.08}(S_{1.84}As_{0.08})_{1.92}$
									Ir,	Os(S, J)	As)				
6	NF 214	Y-325/1-28	1.58	16.42	55.90	1.91	Ι				7.39	16.15	I	99.35	$(\mathrm{Ir}_{0.65}\mathrm{Os}_{0.19}\mathrm{Ru}_{0.04}\mathrm{Rh}_{0.04})_{0.92}(\mathrm{S}_{0.60}\mathrm{As}_{0.48})_{1.08}$
10	17 214	Y-325/1-29	1.53	17.16	56.58	1.71	Ι	Ι	I	I	6.65	15.83	I	99.46	$(Ir_{0,70}Os_{0,22}Ru_{0,04}Rh_{0,04})_{1,00}(S_{0,50}As_{0,50})_{1,00}$

Таблица 5. Химический состав мышьяксодержащих дисульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ (мас. %) из хромитовых руд массива Рай-Из

мере уменьшения глиноземистости) хорошо прослеживается в химическом составе изученных рудных хромшпинелидов (табл. 1); подобная закономерность отмечалась и ранее (Макеев, 1992; Перевозчиков, 1998; Леснов и др., 2008; Юричев, 2017, и др.).

Хромшпинелиды в дунитовом теле находятся в рассеянном состоянии и для концентрации их в рудные тела необходима дальнейшая дифференциация рестита. Одним из наиболее вероятных ее механизмов, очевидно, является пластическое течение вещества, признаки которого неоднократно были отмечены в породах массива Рай-Из (Гончаренко, 1989; Строение.., 1990; Шмелев, 2011; Вахрушева и др., 2017).

Таким образом, концентрирование МПГ и хромшпинелидов в массиве Рай-Из, по-видимому, было связано с мобилизацией хрома и ЭПГ из несмесимой рудносиликатной жидкости, отделившейся от большого объема «материнского» лерцолитового субстрата (содержащего ЭПГ в состоянии рассеяния) в ходе его частичного плавления. Дальнейшая судьба тугоплавких ЭПГ, очевидно, определялась их концентрированием в виде микровключений самородных элементов и их сульфидов в сингенетично кристаллизующихся зернах высокомагнезиального хромшпинелида.

Очевидно, что к наиболее ранним мантийно-магматическим образованиям (первичной ассоциации) среди изученных МПГ относятся самородные осмий, Ігсодержащий осмий, иридий и сульфиды (дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда, кашинит и купроиридсит), что обусловлено, в первую очередь, высокой степенью идиоморфизма включений, а также их нередкими полифазными (двух и трехминеральными) формами нахождения и «стерильными» в отношении других цветных металлов химическими составами. При этом, если осмий и иридий преимущественно отмечаются в виде самородных форм, то рутений – в виде сульфида – лаурита. Такой парагенезис первичных Os–Ir–Ru-сульфидов и сплавов типичен для подиформных хромитовых руд многих массивов Урала (Аникина и др., 1993; Melcher et al, 1997; Garuti et al., 1999; Гурская и др., 2004; Zaccarini et al., 2008; Zaccarini et al., 2016).

Показано, что МПГ из хромитовых руд массива характеризуются аномально высокими содержаниями иридия, что выражается не только в его постоянном присутствии в химическом составе минералов осмия и рутения, но и наличии самородной формы, а также образовании специфических сульфидов (кашинита, купроиридсита). Подобная закономерность отмечалась и ранее (Pasava et al., 2011).

Такой парагенезис первичных МПГ, по нашему мнению, указывает на их отложение в необычно широком диапазоне фугитивности серы и температуры по сравнению с хромитовыми рудами из других офиолитовых комплексов. Такие условия, по-видимому, свойственны хромитобразующей системе флюидно-метасоматизированной верхней мантии (при высокой активности флюидов) (Melcher et al, 1997; Garuti et al., 1999;).

С учетом того, что конечный парагенезис МПГ (сульфиды–сплавы) зависит от начальной fS_2 и времени кристаллизации хромшпинелида (Garuti et al., 1999; Zaccarini et al., 2018), выявленная первичная ассоциация МПГ в массиве Рай-Из указывает, что фугитивность серы изначально была настолько низкой, что позволила осаждение самородных осмия и иридия. При дальнейшем повышении fS_2 эти зерна смогли сосуществовать с лауритом и, вероятно, кашинитом. Замещение рутения на осмий в составе лаурита увеличивалось с понижением температуры, вплоть до поля эрлихманита. Выявленный купроиридсит, вероятно, вошел в свою область стабильности при более высоких значениях fS_2 и более низких температурах, что объясняет его исключительную ассоциацию с самородным иридием и лауритом, богатым осмием или эрлихманитом. Вслед за образованием купроиридсита произошла кристаллизация хромшпинелидов, что предотвратило повторное уравновешивание включений МПГ в связи с их «запечатыванием» во вмещающих зернах хромшпинелидов. Образование остальных самородных минералов и интерметаллидов ЭПГ с участием подвижных металлов (Ni, Cu, Zn, Mn, As) и выносом части сульфидной серы связывается авторами с последующим метаморфическим преобразованием первичных МПГ, которые «распечатывались» из зерен хромшпинелидов, в процессе катаклаза последних, и подвергались воздействию преобразующих флюидов. Вновь образуемые вторичные МПГ формировались либо на месте первичных МПГ, нередко сохраняя контуры первоначального габитуса зерна, либо, в процессе ремобилизации ЭПГ, выносились в зоны трещиноватости хромшпинелидов и интерстиции между такими зернами.

При этом в более «свежих», практически не измененных хромовых рудах Центрального месторождения к таким МПГ относятся самородный рутенистый никель, неназванный интерметаллид (Rh,Pt)₃Zn и мышьяксодержащие дисульфиды лауритэрлихманитового ряда. Руды месторождения № 214 были изменены в условиях более высокой фации метаморфизма прогрессивного этапа, о чем свидетельствуют признаки катаклаза, повсеместное развитие в рудах хлорита-кеммерерита, магнетитовые каймы на зернах хромшпинелида, а также присутствие антигорита во вмещающих породах. Подобный вывод находит подтверждение в монографиях (Макеева, Брянчанинова, 1999; Вахрушева и др., 2017). В целом более интенсивное метаморфическое преобразование хромитовых руд месторождения № 214 обусловило их обильное насыщение вторичными МПГ, среди которых выделены самородный рутений и его железистая разновидность, самородная платина, мышьяксодержащий лаурит, неназванный сульфоарсенид Ir,Os(S,As) и новый интерметаллид (Rh,Pt)₃Zn.

Как показывают исследования А.Б. Макеева, в эволюции платиноносных альпинотипных ультрамафитов Урала выделяется два этапа метаморфизма: региональнометаморфический (регрессивный автометаморфизм) и контактово-метаморфический (прогрессивный) (Макеев, 1992; Макеев, Брянчанинова, 1999). Этапу регионального метаморфизма соответствует процесс серпентинизации (лизардитизации) силикатов. Продуктами реакций гидратации также являются актинолит, тальк, железо-никелевые сульфиды. Контактово-метаморфический (прогрессивный) этап минералообразования связан со вторичным прогревом ультраосновных массивов под воздействием внедряющихся соседних интрузий разного возраста и состава. Индикаторной минеральной ассоциацией этого этапа является антигорит-магнетитовая.

Проведенные исследования позволяют предположить, что выявленные вторичные МПГ сформировались преимущественно в регионально-метаморфический (регрессивный этап) о чем также свидетельствует их постоянная тесная ассоциация с халькозином и лизардитом. Сюда отнесены самородный рутений, самородный рутенистый никель, неназванный МТР (Ru,Ni,Os,Fe), мышьяксодержащие дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда и нназванный сульфоарсенид Ir,Os(S,As).

Неправильные (бесформенные) выделения самородного рутения в катаклазированных зернах хромшпинелидов и серпентиновых интерстициях, вероятно являются стандартным продуктом десульфуризации лаурита при серпентинизации.

MTP (Ru,Ni,Os,Fe), характеризующиеся губчатой (пористой) структурой, очевидно, также являются продуктом десульфуризации самородного осмистого лаурита, сопровождающейся привносом никеля и железа (из преобразуемого оливина) и частичным выносом рутения. Последний, вероятно, отчасти концентрировался в образующемся синхронно самородном рутенистом никеле.

В настоящее время в мировой литературе присутствуют многочисленные свидетельства метаморфического преобразования первичных Os–Ir–Ru-сульфидов изоморфного ряда лаурит–эрлихманит в результате их десульфуризации (Stockman, Hlava, 1984; Garuti, Zaccarini, 1997; Bai et al., 2000; Мурзин и др., 2023). При этом на начальной и средней стадиях данный процесс имеет диффузионную природу и не приводит к изменению агрегатного состояния минерального вещества (Малич и др., 2016). Свидетельством являются псевдоморфозы по лауриту (рис. 4, *д*; рис. 5, *в*).

Наложенное развитие мышьяксодержащих сульфидов и сульфоарсенидов Ru, Os и Ir также связывается с процессом серпентинизации, вызывающим вынос части сульфидной серы из лигандной группировки минералов. Этот процесс сопровождается увеличением в химическом составе МПГ роли иридия, а также привносом подвижных при серпентинизации родия, никеля и железа. Прямая зависимость между содержаниями иридия и мышьяка объясняется «разрыхлением» структуры лаурита и эрлихманита за счет вхождения мышьяка, что стимулирует, в свою очередь, вхождение в них иридия (Мурзин, Суставов, 2000).

Самородный железистый рутений, развивающийся по самородному рутению, самородная платина и новый интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn авторы склонны связывать с контактово-метаморфическим (прогрессивным антигоритовым) этапом метаморфизма, связанным с внедрением габброидов. Об этом свидетельствуют морфология зерен и своеобразная губчато-пористая структура данных МПГ, их обнаружение преимущественно в катаклазированных, брекчированных зернах хромшпинелидов, интенсивное развитие в интерстициях хлорит-кеммерерит-магнетитовых агрегатов и присутствие антигорита во вмещающих породах.

Отнесение к данному этапу неназванного интерметаллида (Rh,Pt)₃Zn подтверждается тем, что цинковые минералы, в том числе вюртцит и природная латунь (самородная цинкистая медь) диагностированы ранее именно в антигоритовых серпентинитах вблизи Центрального месторождения (Макеев и др., 1999; Yang et al., 2015). При этом привнос цинка, вероятно, мог осуществляться из зерен хромшпинелидов, где его содержание по нашим данным составляет до 0.16 мас. % (табл. 1), а по ранее полученным данным может составлять до 0.4 мас. % (Вахрушева и др., 2017). Определенный интерес представляет то, что ранее данный интерметаллид был нами также диагностирован в хромитовых рудах Кемпирсайского массива (Южный Урал) (Юричев, Чернышов, 2018; Юричев и др., 2019).

выводы

1. В ходе настоящего исследования минералогия МПГ массива Рай-Из расширена с 24 ранее выделенных минералов [самородные иридий, осмий, рутений, рутениридосмит, лаурит, эрлихманит, купроиридсит, кашинит, толовскит, ирарсит, холлингвортит, руарсит, руарсенит, черепановит, родиевый пентландит (с содержанием Rh до 8 мас. %), изоферроплатина, родистая изоферроплатина (с содержанием Rh до 2.7 мас. %), медисто-никелистая тетраферроплатина, неназванные сульфиды $Ir_2(Ni,Cu,Fe)_4S_7$, (Ni,Ir,Fe,Rh,Cu)S, (Cu,Ni,Os,Fe)₅S₆, (Ni,Fe,Cu)₂(Ir,Rh)S₃ и (Ni,Fe,Cu)₂(Ir,Rh)S₄ и неназванный арсенид (Rh,Ni)₂As)] до 31. Впервые выявлены и охарактеризованы самородные железистый рутений, никель рутенистый (иридисто-рутенистый), самородная платина, новый интерметаллид (Rh,Pt)₃Zn с содержанием родия до 88 мас. %, мышьяксодержащие дисульфиды ряда лаурит–эрлихманит (с содержанием As до 4.2 мас. %), а также неназванный сульфоарсенид с формулой Ir,Os(S,As). Впервые обнаружены зерна самородного рутения с высоким содержанием рутения до 80.5 мас. %, наряду с ранее охарактеризованным минералом с содержанием ем рутения до 36.8 мас. % (рис. 7, *a*).

2. Все МПГ месторождения № 214 были выделены в концентрате технологических проб (Гурская и др., 2004; Yang et al., 2015). В ходе настоящего исследования в аншлифах хромитовой руды из месторождения № 214 диагностировано 12 МПГ из 15 ранее выделенных, что полностью подтверждает предположение о наиболее



Рис. 7. Тройные диаграммы для МПГ из хромовых руд массива Рай-Из: состав самородных осмия, иридия и рутения (*I*), в том числе содержащих примеси Fe, Ni и Cu (*2*). Поле несмесимости по (Harris, Cabri, 1991) (*a*); состав минералов ряда лаурит-эрлихманит (*3*), в том числе мышьяксодержащих разновидностей (*4*) (*б*). Оконтурены поля составов (красные и синие кружки – отдельные анализы) по данным предшествующих работ: красное поле (Строение.., 1990; Аникина, 1995; Гурская и др., 2004;), синее поле (Yang et al., 2015; Макеев, Брянчанинова, 2017).

Fig. 7. Ternary diagrams for PGMs from chrome ores of the Rai-Iz massif: composition of native osmium, iridium and ruthenium (1), including those containing Fe, Ni and Cu impurities (2). Immiscibility field according to (Harris, Cabri, 1991) (a); composition of minerals of laurite-erlichmanite series (3), including arsenic-containing varieties (4) (δ). Fields of compositions are contoured (red and blue circles – individual analyses) according to data from previous works: red field (Structure.., 1990; Anikina, 1995; Gurskaya et al., 2004;), blue field (Yang et al., 2015; Makeyev, Bryanchaninova, 2017).

разнообразной минералогии МПГ данного месторождения массива Рай-Из (Гурская и др., 2004; Ширяев, 2021).

3. Распространенность и минеральное разнообразие МПГ массива Рай-Из зависят от густоты вкрапленности хромовых руд, степени их катаклаза и метаморфического преобразования. Так, в практически неизмененных рудах Центрального месторождения обнаружено только 7 МПГ, среди которых преобладают дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда и полностью, за исключением самородного рутенистого никеля и нового интерметаллида родия (Rh,Pt)₃Zn, отсутствуют минералы самородных элементов и их сплавы. И наоборот, заметно катаклазированные и метаморфизованные хромитовые руды месторождения № 214 обнаруживают в своем составе 12 МПГ, среди которых преобладает группа самородных минералов (самородные рутений, железистый рутений, осмий, иридий и платина).

Отмечено, что сплошные хромовые руды характеризуются более широким минеральным разнообразием МПГ, чем средневкрапленные. Из 7 диагностированных МПГ в рудах Центрального месторождения в средневкрапленных рудах найдено 2 минерала, а в сплошных – все 7. Из 12 МПГ, обнаруженных в рудах месторождения № 214, в средневкрапленных выявлено 5 минералов, а в сплошных – 11.

4. Диагностированные минералы самородных металлов и дисульфиды лауритэрлихманитового ряда по химическому составу хорошо сопоставляются с ранее полученными данными, расширяя и дополняя их (рис. 7). Отмечено, что если дисульфиды в основном соответствуют рутениевому сульфиду — лауриту, то более поздние мышьяксодержащие дисульфиды представлены осмиевой или осмий-иридиевой разновидностями.

5. Проведенное изучение МПГ из хромитовых руд месторождений Центральное и № 214 позволяет сделать вывод, что в них сохранены комплексы платиноидов, отражающие особенности верхнемантийного глубинного минералообразования. К таким мантийно-магматическим образованиям авторы склонны отнести самородные осмий, Ir-содержащий осмий, иридий и сульфиды (дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда, кашинит и купроиридсит). Образование остальных самородных минералов и интерметаллидов ЭПГ, происходившее с участием подвижных металлов (Ni, Cu, Zn, Mn, As) и сопровождавшееся выносом части сульфидной серы, связывается с последующим метаморфическим преобразованием первичных МПГ, которые «распечатывались» из зерен хромшпинелидов в процессе катаклаза последних и подвергались воздействию преобразующих флюидов.

6. Проведенные исследования позволяют предположить, что выявленные вторичные МПГ сформировались преимущественно в регионально-метаморфический (регрессивный) этап [самородные рутений, рутенистый никель, неназванный МТР (Ru,Ni,Os,Fe), мышьяксодержащие дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда и неназванный сульфоарсенид Ir,Os(S,As)] и, в меньшей степени, в контактово-метаморфический (прогрессивный антигоритовый) этап [самородный железистый рутений, самородная платина и новый интерметаллид родия (Rh,Pt)₃Zn].

Авторы выражают искреннюю признательность ведущему научному сотруднику Института геологии и геохимии УрО РАН, к. г.-м. н. Н.В. Вахрушевой и старшему научному сотруднику ВИМС Н.Е. Никольской за любезно предоставленные образцы хромитовых руд месторождений Центральное и № 214 из личных минералогических коллекций. Также авторы выражают благодарность рецензенту за тщательный анализ статьи и сделанные замечания, которые позволили улучшить ее содержательную часть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аникина Е.В., Молошаг В.П., Алимов В.Ю. Минералы платиноидов в хромитах Войкаро-Сыньинского и Райизского массивов // Доклады Академии наук. **1993**. Т. 330. № 5. С. 613–616.

Аникина Е.В. Платиноиды в хромовых рудах Полярного Урала. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, **1995**. 40 с.

Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, **2017**. 265 с.

Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Том. ун-та, **1989**. 404 с.

Гурская Л.И., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Смелова Л.В., Шахова С.Н. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала. СПб.: Изд-во СПб. картфабрики ВСЕГЕИ, **2004**. 306 с.

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

Леснов Ф.П., Подлипский М.Ю., Поляков Г.В., Палесский С.В. Геохимия акцессорных хромшпинелидов из пород Эргакского хромитоносного гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян) // Доклады Академии наук. **2008**. Т. 422. № 5. С. 660–664.

Макеев А.Б. Формы нахождения платиноидов в альпинотипных ультрабазитах Урала / Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, **1994**. С. 175–183.

Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. С.-Пб.: Наука, 1992. 197 с.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Самородные платиноиды в коренных рудах и россыпях Полярного, Приполярного, Северного Урала и Тимана / Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, **2017**. С. 185–188.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука, **1999**. 252 с.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И., Крапля Е.А. Геолого-минералогическая модель эволюции платиноносных альпинотипных ультрабазитов Урала / Платина России. Т. IV. М.: Геоинформмарк, **1999**. С. 176–183.

Макеев А.Б., Котов А.А., Бегизов В.Д., Караченцев С.Г., Вяльсов Л.Н. Состав и свойства платиноидов системы Pt–Ru–Os–Ir из аллювиальных отложений Урала / Минералогическая кристаллография и свойства минералов: Труды Института геологии Коми филиала АН СССР. Сыктывкар, **1984**. С. 95–103.

Макеев А.Б., Перевозчиков Б.В., Афанасьев А.К. Хромитоносность Полярного Урала. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, **1985**. 152 с.

Малич К.Н., Аникина Е.В., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Пушкарев Е.В., Хиллер В.В. Вещественный состав и осмиевая изотопия первичных и вторичных ассоциаций минералов платиновой группы магнезиальных хромититов Нуралинского лерцолитового массива (Ю. Урал, Россия) // Геология рудных месторожд. **2016**. Т. 58. № 1. С. 3–22.

Мурзин В.В., Малич К.Н., Баданина И.Ю., Варламов Д.А., Чащухин И.С. Минеральные ассоциации хромититов Алапаевского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал) // Литосфера. **2023**. Т. 23. № 5. С. 740–765.

Мурзин В.В., Суставов С.Г. Новые данные о минералогии ряда лаурит–эрликманит и их мышьяковистых разновидностей // Доклады Академии наук. **2000**. Т. 370. № 3. С. 380–382.

Никольская Н.Е., Казеннова А.Д., Николаев В.И. Типоморфизм рудообразующего хромшпинелида месторождений хромовых руд. М.: ВИМС, **2021**. 238 с.

Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. **1949**. Вып. 103. С. 1–91.

Перевозчиков Б.В. Особенности изучения хромитоносности альпинотипных гипербазитов. М.: Геоинформмарк, **1998**. 47 с.

Перевозчиков Б.В., Булыкин Л.Д., Попов И.И., Орфаницкий В.Л., Андреев М.И., Сначев В.И., Даниленко С.А., Черкасов В.Л., Ченцов А.М., Жарикова Л.Н., Клочко А.А. Реестр хромитопроявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь: КамНИИКИГС, **2000**. 474 с.

Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, **1987**. 230 с.

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

Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из / отв. ред. В.Н. Пучков, Д.С. Штейнберг. Свердловск: УрО АН СССР, **1990**. 226 с.

Талхаммер Т.В. Ассоциации минералов платиновой группы в массивных хромитовых рудах Кемпирсайского офиолитового комплекса (Южный Урал) как проявление мантийного метасоматоза // ЗВМО. **1996**. Т. 125. № 1. С. 25–36.

Толстых Н.Д. Платиновая минерализация массивов Кондер и Инагли // Геосферные исследования. **2018**. № 1. С. 17–32.

Шинкарёв Н.Ф., Иваников В.В. Физико-химическая петрология изверженных пород. Л.: Недра, **1983**. 271 с.

Ширяев П.Б. Окситермобарометрия, вещественный состав и генетические особенности хромовых руд массивов Рай-Из и Войкаро-Сыньинский (Полярный Урал). Автореф. дисс. ... канд. г.-м. н. М., **2021**. 24 с.

Шмелев В.Р. Мантийные ультрабазиты офиолитовых комплексов Полярного Урала: петрогенезис и обстановка формирования // Петрология. **2011**. Т. 19. № 6. С. 649–672.

Юричев А.Н. Рудные хромшпинелиды массивов Сыум-Кеу и Харчерузский: химизм и генетическая природа, Полярный Урал // Руды и металлы. **2017**. № 2. С. 51–59.

Юричев А.Н. Минералы платиновой группы в хромититах Агардагского ультрамафитового массива (республика Тыва): новые данные // ЗРМО. **2022**. Т. 151. № 4. С. 56–69.

Юричев А.Н., Чернышов А.И. Платиноиды системы Rh–Zn–Pt из хромититовского ультрамафитового массива (Южный Урал, Казахстан) // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Мат. Х Всероссийск. конф. Вып. 10. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, **2018**. С. 445–446.

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.

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.

Platinum Group Minerals from Chromite Ores of the Rai-Iz Ultramafic Massif (Polar Ural): New Data

© 2024 A. N. Yurichev*, A. I. Chernyshov, E. V. Korbovyak

Tomsk State University, Tomsk, Russia * e-mail: juratur@yandex.ru

In chromite ores of Central and No. 214 deposits of the Rai-Iz ultramafic massif, which is part of the Khadatinsky ophiolite belt of the Polar Urals, along with previously known platinum group minerals (PGM), native ferrous ruthenium, native ruthenium nickel (iridium-ruthenium), native platinum, new unnamed intermetallic compound (Rh,Pt)₃Zn (with Rh content of up to 88 wt %), As-rich disulfides of laurite-erlichmanite series (with As content of up to 4.2 wt %) and unnamed sulfoarsenide with stoichiometric formula (Ir,Os)(S,As) were discovered and characterized for the first time. Grains of native ruthenium with Ru content of up to 80.5 wt % were diagnosed for the first time, against the previously known Ru content of up to 36.8 wt %. The set of PGMs of massif has been expanded from 24 to 31 mineral varieties. It has been shown that diversity of PGMs depends on density of dissemination of chromite ores, degree of their cataclasis and metamorphic transformation. Solid (massive) and noticeably metamorphosed chromite ores exhibit widest and most diverse set of PGMs. The Rai-Iz massif has preserved platinum group complexes that reflect features of upper mantle deep mineral formation. Such early mantle-magmatic formations include native osmium, Ir-containing osmium, native iridium and sulfides (disulfides of the laurite-erlichmanite series, kashinite, and cuproiridsite). Formation of other specific native minerals and intermetallics of PGE, with participation of mobile metals (Ni, Cu, Zn, Mn, As) and removal of part of sulfide sulfur, is associated with cataclasis and metamorphic transformation of ore chrome spinels and primary PGM included in them. The identified secondary PGMs were formed mainly in regional-metamorphic (regressive) stage [native ruthenium, ruthenium nickel, unnamed MSS (Ru, Ni, Os, Fe), As-rich disulfides of the laurite-erlichmannite series and unnamed sulfoarsenide (Ir.Os)(S,As)] and, to lesser extent, in contact-metamorphic (progressive) stage (native ferrous ruthenium, native platinum and new intermetallic of rhodium (Rh,Pt)₃Zn).

Keywords: Polar Urals, ophiolites, Rai-Iz massif, chromite ores, platinum group minerals

REFERENCES

Anikina E.V., Moloshag V.P., Alimov V.Yu. Platinoid minerals in chromites of the Voykar-Syninsky and Rai-Iz massifs. *Reports Acad. Sci.* **1993**. Vol. 330. N 5. P. 613–616 (*in Russian*).

Anikina E.V. Platinoids in chromium ores of the Polar Urals. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center Ural Branch RAS, **1995**. 40 p. (*in Russian*).

Bai W., Robinson P.T., Fang Q., Yang J., Yan B., Zhang Z., Xu-Feeng Hu, Zhou M.-F., Malpas J. The PGE and base metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. Canad. Miner. 2000. Vol. 38. N 3. P. 585–598.

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

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 (*in Russian*).

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., Zaccarini F., Moloshag V., Alimov V. Platinum-group minerals as indicators of sulfur fugacity in ophiolitic upper mantle: an example from chromitites of the Rai-Iz ultramafic complex, Polar Urals, Russia. *Canad. Miner.* **1999**. Vol. 37. P. 1099–1115.

Goncharenko A.I. Deformation and petrostructural evolution of alpine-type ultramafic rocks. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, **1989**. 404 p. (*in Russian*).

Gurskaya L.I., Smelova L.V., Kolbantsev L.R., Lyakhnitskaya V.D., Lyakhnitsky Yu.S., Shakhova S.N. Platinoids of chromite-bearing massifs of the Polar Urals. Saint Petersburg: VSEGEI, **2004**. 306 p. (*in Russian*).

Harris D.C., Cabri L.J., Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. Canad. Mineral. 1991. Vol. 29. P. 231–237.

Kucherina P.M., Popov I.I., Pryamonosov A.P., Krasheninnikov A.L., Krasheninnikova L.I., Perminov I.G., Tsvigun L.N., Gaptulkadyrov M.M., Mustakimova E.A. Geological Structure and Mineral Resources of the Northwestern Voikar Synclinorium and the Rai-Iz Massif Area and Borders. 1:50000. Information Report. Vol. 1. Polar Ural Geological Exploration Expedition, **1991**. 431 p. (*in Russian*).

Lesnov F.P., Podlipskii M.Yu., Polyakov G.V., Palesskii S.V. Geochemistry of accessory chrome-spinellides from rocks of the Ergakskii chrome-bearing hyperbasite massif (Western Sayan) and conditions of its formation. *Doklady Earth Sci.* **2008**. Vol. 423. N 1. P. 1245–1249.

Makeyev A.B. Forms of occurrence of platinoides in alpine-type ultrabasites of the Urals. In: Geology and genesis of platinum metal deposits. Moscow: Nauka, **1994**. P. 175–183 (in Russian).

Makeyev A.B. Mineralogy of alpine-type ultrabasites of the Urals. Saint Petersburg: Nauka, **1992**. 197 p. (*in Russian*).

Makeyev A.B., Brianchaninova N.I. Native platinum group metals in bedrock ores and placers of the Polar, Subpolar, Northern Urals and Timan. In: *Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential.* Ulan-Ude: Publishing house of Buryat State University, **2017**. P. 185–188 (*in Russian*).

Makeyev A.B., Brianchaninova N.I. Topomineralogy of ultramafic rocks of the Polar Urals. Saint Petersburg: Nauka, **1999**. 252 p. (*in Russian*).

Makeyev A.B., Brianchaninova N.I., Kraplya E.A. Geological and mineralogical model of evolution of platinum-bearing alpine-type ultrabasites of the Urals. In: *Platinum of Russia. Vol. IV.* Moscow: Geo-informmark, **1999**. P. 176–183 (*in Russian*).

Makeyev A.B., Kotov A.A., Begizov V.D., Karachentsev S.G., Vyalsov L.N. Composition and properties of platinum group metals of Pt-Ru-Os-Ir system from alluvial deposits of the Urals. In: *Mineralogical crystallography and properties of minerals. Trans. Inst. Geol. Komi branch USSR Acad. Sci.* Syktyvkar, **1984**. P. 95–103 (*in Russian*).

Makeyev A.B., Perevozchikov B.V., Afanasyev A.K. Chromite content of the Polar Urals. Syktyvkar: Komi Branch of the USSR Acad. Sci., **1985**. 152 p. (*in Russian*).

Malitch K.N., Anikina E.V., Badanina I.Y., Pushkarev E.V., Khiller V.V., Belousova E.A. Chemical composition and osmium-isotope systematics of primary and secondary PGM assemblages from high-Mg chromitite of the Nurali lherzolite massif, the South Urals, Russia. *Geol. Ore Deposits.* **2016**. Vol. 58. N 1. P. 1–19.

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.

Murzin V.V., Malich K.N., Badanina I.Yu., Varlamov D.A., Chashchukhin I.S. Mineral associations of chromitites of the Alapaevsky dunite-harzburgite massif (Middle Urals). *Lithosphere*. **2023**. Vol. 23. N 5. P. 740–765 (*in Russian*).

Murzin V.V., Sustavov S.G. New data on minerals of the laurite-erlichmanite series and on their arsenic varieties. *Doklady Earth Sci.* **2000**. Vol. 370. N 3. P. 160–162.

Mysen B.O., Kushiro I. Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. Amer. Miner. 1977. Vol. 62. N 9/10. P. 843–856.

Nikolskaya N.E., Kazennova A.D., Nikolaev V.I. Typomorphism of ore-forming chromospinelide of chrome ore deposits. Moscow: VIMS, **2021**. 238 p. (*in Russian*).

Pašava J., Knesl I., Vymazalova A., Vavrin I., Gurskaya L.I., Kolantsev L.R. Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements (PGE) in chromites from Centralnoye I, Polar Urals, Russia. *Geosci. Frontiers.* **2011**. Vol. 2. N 1. P. 81–85

Pavlov N.V. Chemical composition of chromospinelides in connection with the petrographic composition of rocks of ultrabasic intrusives. Proc. Geol. Inst. USSR Acad. Sci. 1949. Vol. 103. P. 1–91 (in Russian).

Perevozchikov B.V. Peculiarities of studying the chromite-bearing of alpine-type hyperbasites. Moscow: Geoinformmark, **1998**. 47 p. (*in Russian*).

Perevozchikov B.V., Bulykin L.D., Popov I.I., Orfanitsky V.L., Andreev M.I., Snachev V.I., Danilenko S.A., Cherkasov V.L., Chentsov A.M., Zharikova L.N., Klochko A.A. Register of chromite occurrences in alpine-type ultrabasites of the Urals. Perm: KamNIIKIGS, **2000**. 474 p. (*in Russian*).

Savelyeva G.N. Gabbro-ultramafic complexes of ophiolites of the Urals and their analogues in modern oceanic crust. Moscow: Nauka, **1987**. 230 p. (*in Russian*).

Shinkarev N.F., Ivanikov V.V. Physicochemical petrology of igneous rocks. Leningrad: Nedra, **1983**. 271 p. (*in Russian*).

Shiryaev P.B. Oxythermobarometry, material composition and genetic characteristics of chromium ores of the Rai-Iz and Voykar-Syninsky massifs (the Polar Urals). Ph. D. thesis syn. Moscow, **2021**. 24 p. (*in Russian*).

Shmelev V.R. Mantle ultrabasites of ophiolite complexes in the Polar Urals: petrogenesis and geodynamic environments. *Petrology*. **2011**. Vol. 19. N 6. P. 618–640.

Smirnova T.A. Telluric iron in ultrabasic rocks of the Kempirsai pluton. Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.). **1970**. Part 99. N 6. P. 745–748 (in Russian).

Stockman H.W., Hlava P.F. Platinum-group minerals in alpine chromitites from southwestern Oregon. *Econ. Geol.* **1984**. Vol. 79. P. 491–508.

Structure, evolution and minerageny of the hyperbasic massif Rai-Iz / Ed. By V.N. Puchkov, D.S. Steinberg. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Acad. Sci, **1990**. 226 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*).

Tolstykh N.D. Platinum mineralization of the Konder and Inagli massifs. *Geosphere research.* **2018**. N 1. P. 17–32 (*in Russian*).

Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. Petrology and chromite-bearing of the Rai-Iz ultramafic massif (Polar Urals). Ekaterinburg: IGG Ural Branch RAS, **2017**. 265 p. (*in Russian*).

Yang J., Meng F., Xu X., Robinson P.T., Dilek Y., Makeyev A.B., Wirth R., Wiedenbeck M., Cliff J. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals. *Gondwana Research*. **2015**. Vol. 27. N 2. P. 459–485.

Yurichev A.N. Ore chromospinelides of the Syum-Keu and Kharcheruz massifs: chemistry and genetic nature, Polar Urals. *Ores and Metals.* **2017**. N 2. P. 51–59 (*in Russian*).

Yurichev A.N. Platinum group minerals in chromitites of the Agardag ultramafic massif (Tuva Republic): new data. Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.). 2022. Part 151. N 4. P. 56–69 (in Russian).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Platinoides of the Rh–Zn–Pt system from the chromitite ultramafic massif (the South Urals, Kazakhstan). Petrology of igneous and metamorphic complexes: Materials of the X All-Russian conference with international participation. Vol. 10. Tomsk: Publishing house of Tomsk CNTI, **2018**. P. 445–446 (*in Russian*).

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*).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. New data on the platinum-bearing potential of chromitites in the Kharcheruz ultramafic massif, Polar Urals. *Geol. Ore Deposits.* **2021**. Vol. 63. N 7. P. 706–716.

Zaccarini F, Garuti G., Pushkarev E., Thalhammer O. Origin of platinum group minerals (PGM) inclusions in chromite deposits of the Urals. *Minerals*. **2018**. Vol. 8. N 9. Paper 379.

Zaccarini F, Pushkarev E.V, Garuti G. Platinum group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia). *Ore Geol. Rev.* **2008**. Vol. 33. P. 20–30.

Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Kazakov I. Platinum-Group Minerals and Other Accessory Phases in Chromite Deposits of the Alapaevsk Ophiolite, Central Urals, Russia. *Minerals.* **2016**. Vol. 6. Paper 108.

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.