

---

МИНЕРАЛЫ  
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

---

ПЛАТИНОНОСНОСТЬ ХРОМИТИТОВ ХАРЧЕРУЗСКОГО  
УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ): НОВЫЕ ДАННЫЕ

© 2020 г. А. Н. Юричев<sup>1</sup>, \*, А. И. Чернышов<sup>1</sup>, Е. В. Корбовяк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

\*e-mail: juratur@sibmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2020 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2020 г.

В хромититах Харчерузского ультрамафитового массива, входящего в состав Хадатинского офиолитового пояса, замыкающего на севере офиолитовые комплексы Полярного Урала, впервые обнаружены и охарактеризованы изолированные мелкие выделения минералов элементов платиновой группы – рутения, осмия и иридия (редких ЭПГ): сульфиды и сульфоарсениды. Полное отсутствие типичных для хромититовых руд металлических твердых растворов Os–Ir–Ru в составе проанализированных образцов указывает на повышенную фугитивность серы при низкой фугитивности кислорода в момент формирования хромититовых руд и сингенетических с ними минералов редких ЭПГ. Отмечена эволюционная направленность фракционирования минералов редких ЭПГ в хромититах Харчерузского массива: в дисульфидах доминирует фракционирование рутения и осмия, в сложных сульфидах редких ЭПГ с цветными металлами (MeS, MeS<sub>2</sub> и Me<sub>3</sub>S<sub>3</sub>) наряду с рутением и осмием возрастает активность иридия и родия, в сульфоарсенидах – иридий и родий занимают ведущую роль в составе соединения при минимальных содержаниях (либо полном отсутствии) осмия и рутения. Процесс формирования ассоциации выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются дисульфиды ряда лаурит–эрлиманит (преимущественно фракционирующие рутений). Остальные сульфиды и сульфоарсениды редких ЭПГ относятся к более поздним образованиям и связаны с процессами мантийного метасоматоза, когда при воздействии восходящих восстановленных флюидов, обогащенных S и As и несущих такие элементы, как Ni, Cu, Rh и Pd, происходили процессы ремобилизации и переноса.

**Ключевые слова:** Полярный Урал, офиолиты, Харчерузский массив, хромититы, минералы ЭПГ, химический состав, генезис

**DOI:** 10.31857/S0869605520030107

Распад СССР повлек за собой потерю для России уникальных Кемпирсайских месторождений хромитовых руд, оказавшихся на территории Казахстана. В этой связи первостепенное значение для государства приобрели хромитоносные крупные массивы Полярноуральского региона – Рай-Из (380 км<sup>2</sup>), Войкаро-Сынынинский (2000 км<sup>2</sup>) и Сым-Кеу (600 км<sup>2</sup>), ценность хромитовых руд которых могла бы быть существенно повышена при попутном извлечении из них металлов платиновой группы. Такой механизм комплексной разработки успешно реализуется в ЮАР, США, ряде стран Средиземноморья. Однако для России это актуальная проблема, поскольку хромитовые руды всегда рассматривались у нас в качестве мономинерального сырья только на

хром. Между тем роль хромитовых руд в мировом производстве платиноидов постепенно продолжает возрастать. Ценность эти руд заключается в наличии среди них примесей дефицитных редких элементов платиновой группы (редких ЭПГ) – иридия, осмия и рутения (Legendre, Auge, 1986; Додин и др., 2003; Малич и др. 2013).

Поскольку крупные ультраосновные полярноуральские массивы стали главным резервом платиносодержащих хромитовых руд, с середины последнего десятилетия XX века началось комплексное планомерное изучение этих объектов, по результатам которого минералы ЭПГ были обнаружены в хромититах каждого из них. Однако последние отличались по своей специфике: в высокомагнезиальных хромититах массива Рай-Из выявлены преимущественно (более 80%) редкие платиноиды – осмий, иридий, рутений; в железистых хромитовых рудах массива Сыум-Кеу наряду с редкими ЭПГ заметно повышена роль платины; в глиноземистых хромититах Войкаро-Сынинского массива широкое распространение имеют платина и палладий (Гурская и др., 2004).

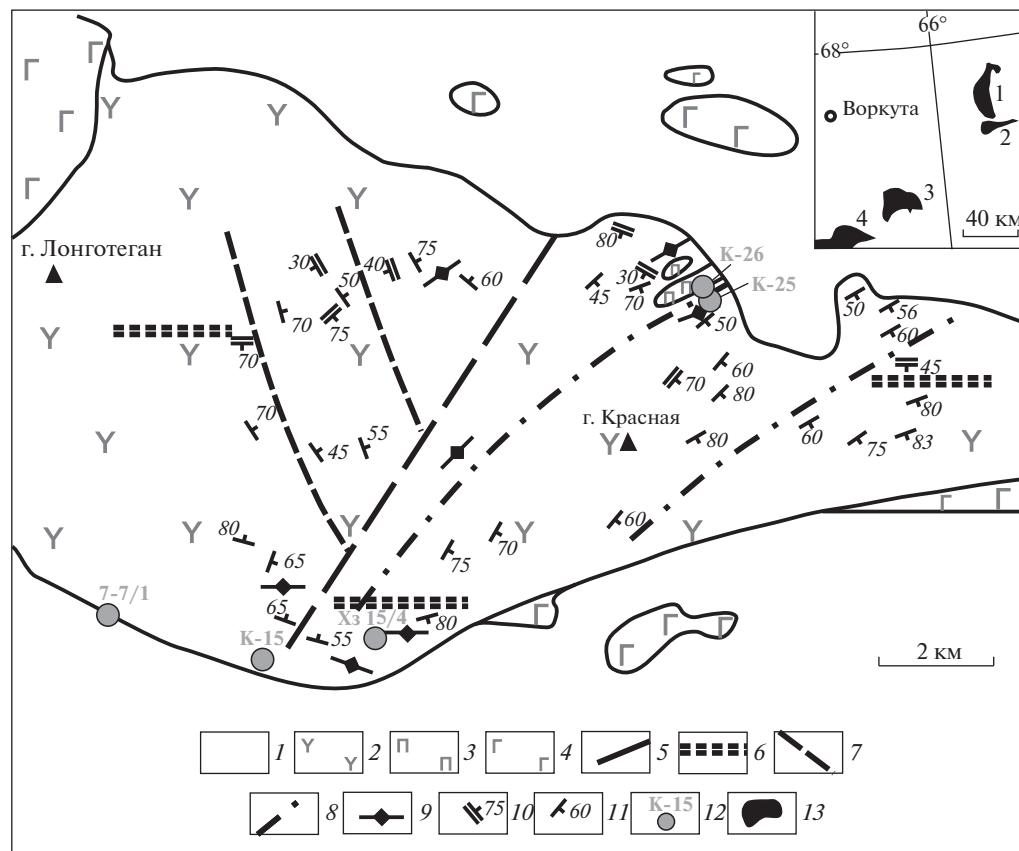
Харчерузский ультрамафитовый массив, входящий вместе с массивом Сыум-Кеу в состав Хадатинского оphiолитового пояса, замыкающего на севере оphiолитовые комплексы Полярного Урала (Петрология..., 1977), остается практически не изученным. Подобное обстоятельство связано с его “более скромными” размерами по сравнению с крупными “соседями”. В настоящей статье авторы задались целью устранить этот пробел, впервые выполнив изучение представительных образцов хромититов Харчерузского массива на платинометальную минерализацию. В работе приводится химическая типизация впервые выявленных минералов ЭПГ, оценены условия и механизмы их образования в хромитовых рудах. Рассмотрены особенности нахождения выделенной платинометальной минерализации в зернах хромитов и интерстициях силикатных минералов.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Харчерузский ультрамафитовый массив является южным фрагментом Хадатинского оphiолитового пояса, который замыкает на севере оphiолитовые комплексы Полярного Урала (рис. 1). Согласно геолого-геофизическим данным, полученным при проведении групповой геологической съемки масштаба 1 : 50 000 (по данным А.К. Афанасьева, 1984 г.), он является самостоятельным и отделен от более крупного ультрамафитового массива Сыум-Кеу метаморфизованными габбро и амфиболитами. Вероятно, он может быть эрозионно-тектоническим фрагментом данного массива. Харчерузский массив представляет собой пластинообразное тело субширотного простирания, его протяженность составляет около 18 км, при максимальной ширине в западной части ~7 км. В центральной части он разделен разломом северо-восточного простирания на западный и восточный блоки.

Вмещающие массив метаморфические образования представлены: на севере и северо-западе – амфиболитами, а на юге – мелкозернистыми пироксенсодержащими амфиболитами. Характер контактов ультрамафитов с окружающими породами повсеместно тектонический. Ультрамафиты в зонах контакта обычно рассланцованны. С юго-востока к ультрамафитам массива непосредственно примыкают соссюритизированные диопсидовые габбро, представляющие, по существу, бластомилониты амфиболитовой фации по габбро.

Харчерузский массив сложен частично серпентинизированными дунитами. Среди дунитов иногда встречаются реликтовые участки гарцбургитов (чаще в западной части массива), а также мелкие тела габброидов, обычно интенсивно метасоматически измененные. В экзоконтактовых зонах габброидов отмечены верлиты и клинопироксениты, которые, вероятно, являются высокотемпературными реакционно-метасоматическими образованиями (Чернышов, Юричев, 2016).



**Рис. 1.** Схема геологического строения Харчерузского массива и его географическое положение (врезка) в структуре Полярного Урала (Чернышов, Юричев, 2016). 1 – четвертичные отложения; 2 – дуниты, гарцибургиты; 3 – верлиты, клинопироксениты; 4 – габброиды; 5 – разлом; 6–8 – структурные линии: 6 –  $S_1$ , 7 –  $S_2$ , 8 –  $S_3$ ; 9–11 – элементы залегания: 9 – хромитовых тел, 10 – уплощенности зерен оливина, 11 – кливажа пластического течения; 12 – участки отбора образцов хромититов, в которых обнаружены минералы ЭПГ; 13 – массивы ультрамафитов: 1 – Сым-Кеу, 2 – Харчерузский, 3 – Рай-Из, 4 – Войкаро-Сынинский.

**Fig. 1.** The geological structure of the Kharcheruz massif and its geographical position (inset) in the structure of the Polar Urals (Chernyshov, Yurichev, 2016). 1 – Quaternary sediments; 2 – dunites and harzburgites; 3 – wehrellites and clinopyroxenites; 4 – gabbroic rocks; 5 – fault; 6–8 – structural lines: 6 –  $S_1$ , 7 –  $S_2$ , 8 –  $S_3$ ; 9–11 – strike and dip symbols: 9 – chromitite body, 10 – flattening of olivine grains, 11 – plastic flow slip planes; 12 – chromitites sampling sites in which PGE minerals are found; 13 – ultramafic massifs: 1 – Syum-Keu, 2 – Kharcheruz, 3 – Rai-Iz, Voikaro-Sinyinsky.

Дуниты имеют средне-, крупнозернистое строение и часто обладают свежим неизмененным обликом со светло-желтой корочкой выветривания. Реже они в различной степени серпентинизированы и нередко тремолитизированы. Черные зерна хромшпинелидов отчетливо выделяются на светло-желтых корочках выветривания и наблюдаются в виде спорадической мелкой вкрапленности. Обычно их менее 1%, редко (на участках сегрегации) до 5–10%, в рудных зонах наблюдаются более высокие содержания. Нередко зерна хромшпинелидов обнаруживают цепочечное и струйчатое распределение, чаще в субширотном направлении.

**Таблица 1.** Химический состав (мас. %) рудных хромшпинелидов Харчерузского массива  
**Table 1.** Chemical composition (wt %) of ore chromospinelites in the Kharcheruz massif

Образец	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>tot</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма
1201/1-2-18	8.07	7.81	59.21	24.61	—	0.36	—	—	100.06
1201/1-2-19	7.80	6.59	59.79	25.23	—	0.35	0.36	—	100.12
1201/1-3-23	7.27	4.23	63.75	23.85	—	—	—	—	99.10
1201/1-3-24	7.49	4.30	64.42	24.37	—	—	0.37	—	100.95
1201/1-3-25	7.28	4.23	64.12	24.65	—	—	—	—	100.28
1201/1-5-32	7.71	5.97	60.31	24.63	—	0.39	—	—	99.01
1201/1-5-33	7.87	6.12	60.62	24.66	0.77	—	—	—	100.04
K-26/1-5-75	4.31	4.12	65.17	25.97	0.66	—	—	—	100.24
X3 15/1-16-289	8.03	8.32	57.84	24.42	0.58	—	0.32	—	99.51
X3 15/1-16-290	7.70	5.26	61.64	24.03	0.54	—	—	—	99.17
K-25-3-324	5.81	3.05	61.15	29.72	—	—	—	—	99.73
K-26/2-17-211	4.76	3.10	66.11	26.12	—	—	—	—	100.09
K-15-2-229	3.97	2.89	65.71	26.80	—	—	—	—	99.37
K-15-2-230	3.97	2.93	65.34	27.09	—	—	—	—	99.32
K-15-6-266	7.69	6.46	56.88	27.57	—	0.33	0.43	1.23	100.59
K-15-6-267	7.49	5.96	58.29	27.80	—	0.38	—	—	99.93
K-15-9-315	7.21	3.80	62.12	25.07	—	—	—	1.16	99.36
K-15-9-316	7.31	4.36	60.56	26.12	0.65	—	0.33	—	99.33
K-15-9-317	7.18	4.18	62.20	26.36	—	—	—	—	99.93
K-15-12-329	8.03	5.72	59.04	26.52	—	—	—	—	99.31
K-15-12-330	8.02	5.10	60.09	25.44	—	—	—	1.22	99.87
7-7/1-9	5.46	2.53	53.06	36.45	0.68	0.67	—	—	98.85
7-7/1-10	5.41	2.78	54.15	36.83	—	0.67	—	—	99.84
7-7/1-14	5.74	2.96	55.18	34.05	—	0.40	—	1.08	99.41
7-7/1-15	5.48	3.09	55.59	33.64	—	0.48	—	1.15	99.43
7-7/1-25	5.77	3.35	53.58	36.38	—	0.65	—	—	99.73
7-7/1-54	5.95	3.09	55.84	34.21	—	0.62	—	—	99.71
7-7/1-59	5.83	2.95	53.58	36.46	0.57	0.57	—	—	99.96
7-7/1-65	5.64	3.09	55.21	35.38	—	0.57	—	—	99.89
7-7/1-66	5.81	2.94	54.54	34.84	—	0.64	—	1.48	100.24
X3 15/4-87	8.71	6.02	61.87	23.13	—	0.26	—	—	99.99
X3 15/4-88	8.29	4.38	64.43	21.97	—	—	—	0.90	99.97
X3 15/4-98	8.36	4.79	64.31	22.51	—	—	—	—	99.97
X3 15/4-99	8.37	6.40	61.25	22.81	—	0.43	—	1.17	100.43
X3 15/4-123	9.11	7.83	59.84	22.57	—	0.34	—	—	99.69
X3 15/4-124	7.59	4.72	62.86	22.56	—	0.26	—	1.19	99.18
X3 15/4-129	9.25	7.36	60.71	23.09	—	0.33	—	—	100.74
X3 15/4-130	8.94	7.24	60.92	22.86	—	—	—	—	99.96

Примечание. FeO<sub>tot</sub> – общее железо.

Среди дунитов выявлены линейные и линзообразные тела хромититов, имеющие преимущественно субширотное простиранение. Мощность отдельных тел обычно менее 1 м, протяженность – до 10 м. Рудные тела нередко группируются в рудные субширотные зоны, в которых количество хромшпинелидов существенно возрастает и может значительно варьировать (от 10 до 50–90%) с образованием от убоговкрапленных до густовкрапленных и сплошных руд (Юричев, Чернышов, 2016).

Ультрамафиты массива претерпели интенсивные пластические деформации и постоянно обнаруживают признаки метаморфизма в виде уплощенного облика зерен оливина, а также кливажа пластического течения, представленного очень тонкой плитчатой отдельностью.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для микроскопических исследований из образцов хромититов были изготовлены плоскогармонические аншлифы толщиной 3–4 мм, с последующим напылением на изучаемые поверхности слоя углерода толщиной 25–30 нм. Рудные минералы изучались с помощью электронных микроскопов Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным детектором UltimMax100 (Oxford Instruments), Tescan Vega II LMU с энергодисперсионной (с детектором Si(Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионной INCA Wave 700 приставками. Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ, текущем токе 15 нА и времени набора спектра 120 с. Диаметр пучка зонда 1–2 мкм. В качестве стандартов для Pt, Ir, Os, Rh, Ru и Co были применены чистые металлы, для Fe и S – пирротин, для Ni – миллерит, для Cu – халькопирит, для As – сперрилит. Для анализов на минералы платиновой группы использованы аналитические линии: La для Pt, Ir, Rh, Ru; Ka для S, Fe, Ni, Cu, As; Ma для Os.

Все анализы выполнены в ЦКП “Аналитический центр геохимии природных систем” ТГУ (г. Томск).

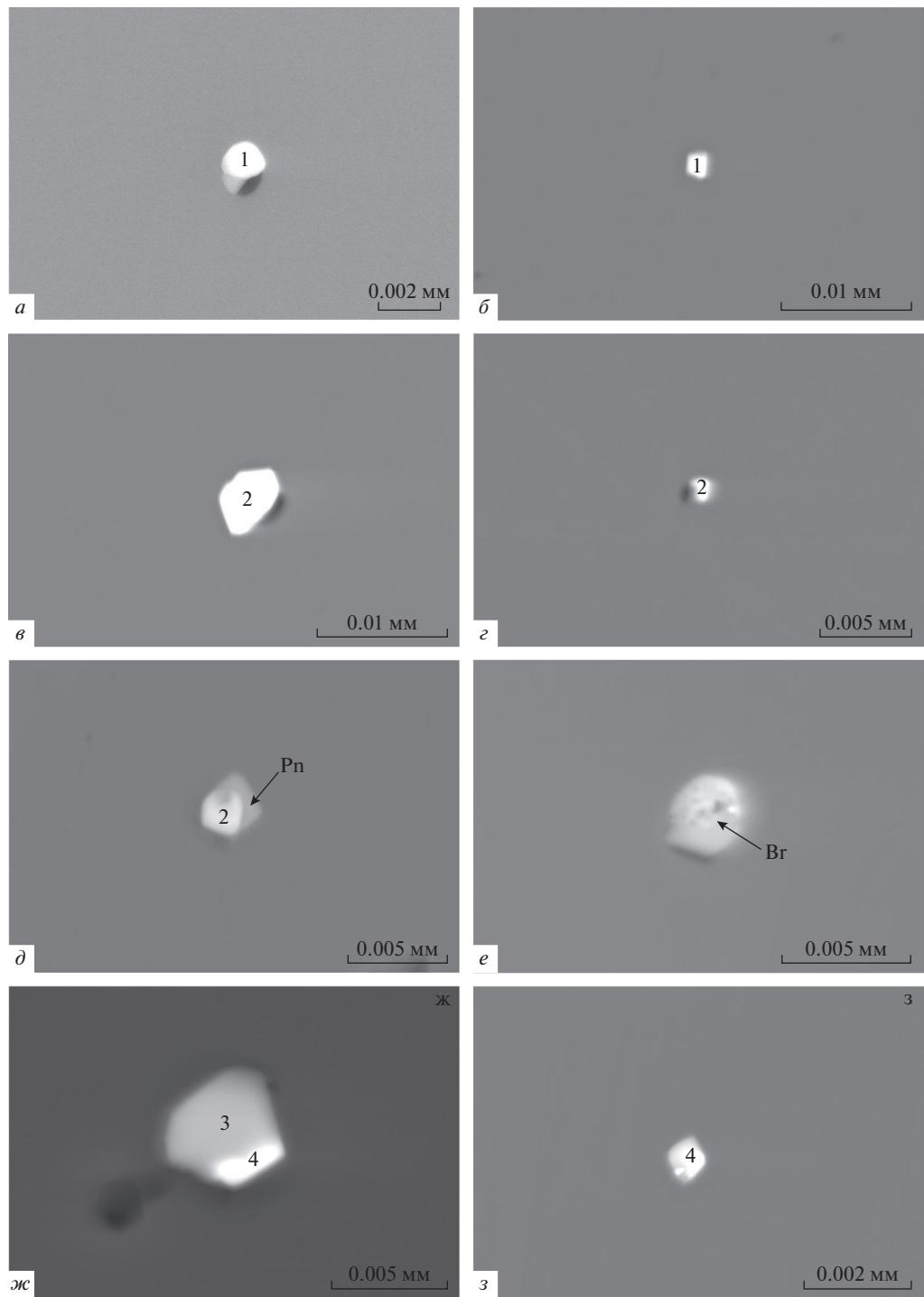
## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ЭПГ В ХРОМИТОВЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЯХ

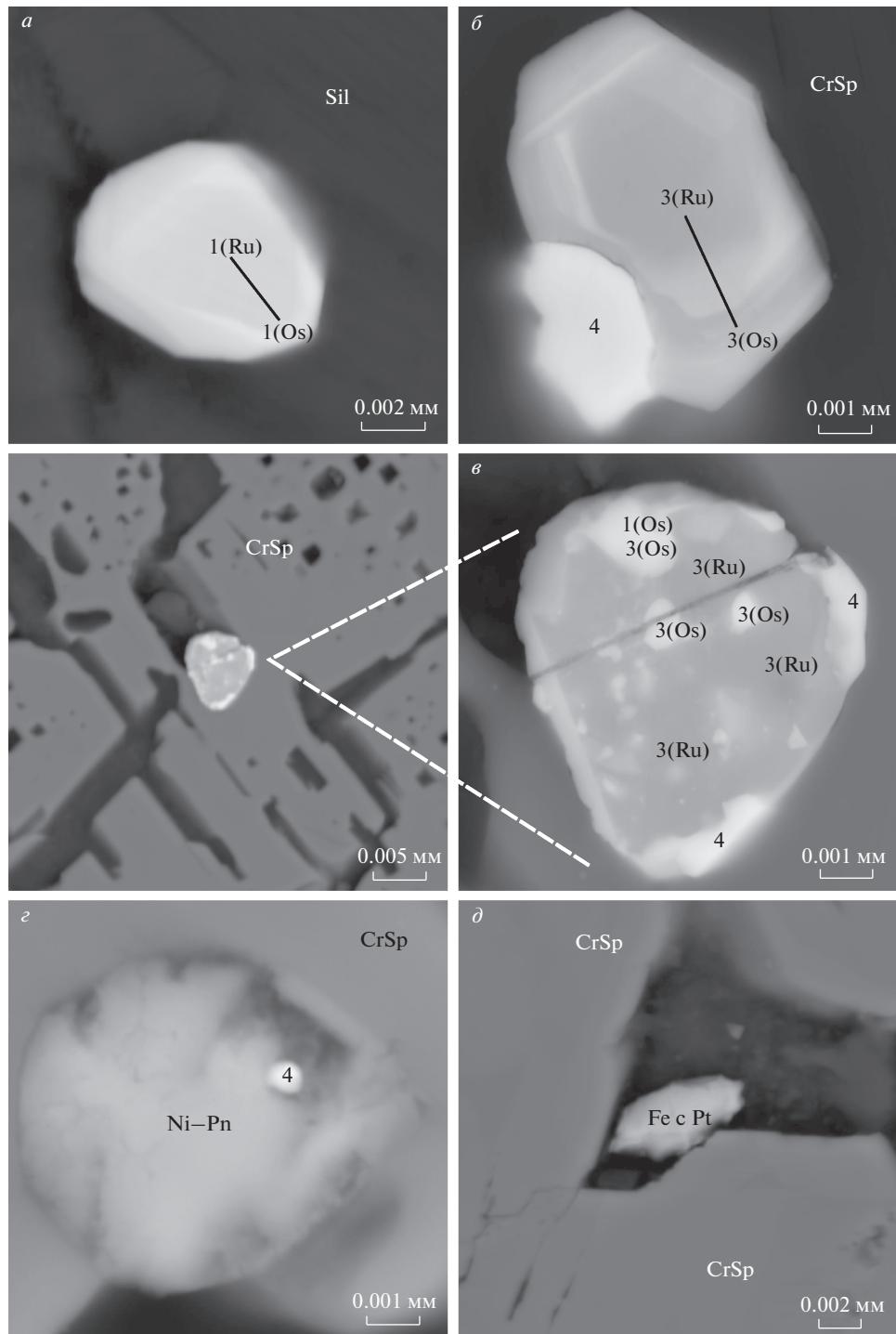
В Харчурузском массиве минералы редких ЭПГ были установлены только в среднегустовкрапленных хромититах, тогда как в сплошных и вкрапленных разновидностях хромититов и акцессорных хромшпинелидах из дунитов и гарцбургитов они не были обнаружены.

Минералы ЭПГ наблюдаются преимущественно в виде изолированных кристаллов таблитчатого облика размером до 10 мкм во внутренних частях зерен хромшпинелидов, отвечающих по химическому составу хромитам и, в меньшей степени, субферрихромитам (табл. 1). Они часто характеризуются близким к идиоморфному шестигранным обликом (рис. 2). В интерстициях силикатных минералов за весь период исследования удалось выявить только два зерна, содержащих ЭПГ. Первое, зональное зерно октаэдрического облика, по составу отвечало дисульфиду лаурит–эрлиманитового

Рис. 2. Зерна минералов редких ЭПГ в среднегустовкрапленных хромититах Харчурузского массива. Изображения в обратно-отраженных электронах. Здесь и далее: 1 – дисульфиды ряда лаурит–эрлиманит, 2 – сложные сульфиды редких ЭПГ и цветных металлов, 3 – мышьяксодержащие дисульфиды ряда лаурит–эрлиманит, 4 – сульфоарсениды редких ЭПГ, Pn – никелистый пентландит с примесью Os, Ir и Ru, Br – борнит с примесью Ir и Pd.

Fig. 2. Grains of rare PGE minerals in moderately and densely disseminated chromitites of the Kharcheruz massif. BSE images. Hereinafter: 1 – disulfides of laurite–erlichmanite series, 2 – complex sulfides of rare PGE and non-ferrous metals, 3 – arsenic-containing disulfides of laurite–erlichmanite series, 4 – rare PGE sulphoarsenides, Pn – nickel-rich pentlandite mixed with Os, Ir, and Ru, Br – bornite mixed with Ir and Pd.





ряда, второе – чешуйке самородного теллурического железа с изоморфной примесью платины (4.1 мас. %) (рис. 3, *a, δ*).

### ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ЭПГ

Исследование минералов редких ЭПГ из средне- и густовкрапленных хромититов позволило разделить их на две основные группы: сульфиды и сульфоарсениды. При этом не обнаружено ни одного включения металлических твердых растворов ЭПГ, являющихся наиболее обычными и хорошо изученными минералами хромитовых месторождений, связанных с охиолитовыми комплексами. Группа сульфидов ЭПГ распространена наиболее широко и представлена дисульфидами, мышьяксодержащими дисульфидами, и сложными сульфидами редких ЭПГ и цветных металлов, а также сульфидами цветных металлов, содержащими ЭПГ.

**Дисульфиды редких ЭПГ.** Минералы этой подгруппы широко представлены обычной для данного комплекса пород и хромитовых рудопроявлений ассоциацией дисульфидов ряда лаурит–эрликманит, которые образуют практически непрерывную изоморфную серию (рис. 2, табл. 2). При этом, если лаурит представлен почти чистой рутениевой разновидностью ( $\text{Ru}_{0.86}\text{Os}_{0.04}\text{Ir}_{0.04}\text{Ni}_{0.03}\text{S}_{2.03}$ ), то чисто осмиеевый конечный член изоморфного ряда не установлен. Характерным “сквозным” изоморфным компонентом является иридиевый, содержание которого в лаурите достигает 7.2 мас. %. Среди прочих изоморфных элементов отмечается никель и железо (до 2.1 и 0.6 мас. % соответственно).

**Мышьяксодержащие дисульфиды редких ЭПГ.** По набору главных компонентов и их атомным соотношениям эти минералы близки к соединениям предыдущей подгруппы. Отличие заключается в том, что в лигандной группировке часть серы замещена мышьяком (содержание As достигает 3.1 мас. %) и, таким образом, эта группа является переходной к достаточно распространенным сульфоарсенидным фазам (табл. 3, рис. 4). Также возрастает роль иридия (до 11.5 мас. %) при меньших содержаниях никеля и железа (до 0.8 и 0.5 мас. % соответственно). В отдельных зернах отмечена примесь родия (до 1.8 мас. %).

При изучении как дисульфидов, так и их мышьяксодержащих разновидностей, помимо однородных мономинеральных кристаллов (рис. 2), выявлены зерна с кольцевой зональностью, обусловленной уменьшением от центра к краевой зоне роли руте-

—————  
**Рис. 3.** Зерна минералов редких ЭПГ в зернах хромитов (CrSp) и интерстициях силикатных минералов (Sil) средне- и густовкрапленных хромититов Харчерузского массива. Изображения в обратно-отраженных электронах. *a* – октаэдрическое зерно дисульфида ряда лаурит–эрликманит с кольцевой зональностью; *б* – шестигранное зерно мышьяксодержащего дисульфида ряда лаурит–эрликманит с кольцевой зональностью, в ассоциации с сульфоарсенидом редких ЭПГ; *в* – полиморфное зерно мышьяксодержащего дисульфида ряда лаурит–эрликманит, с каймами сульфоарсенидов редких ЭПГ; *г* – включение сульфоарсенида редких ЭПГ во вторичном никелистом пентландите; *δ* – чешуйка самородного (теллурического) железа с изоморфной примесью платины.

**Fig. 3.** Grains of rare PGE minerals in chromite grains (CrSp) and interstitial between grains of silicate minerals (Sil) of moderately and densely disseminated chromitites of the Kharcheruz massif. BSE images. *a* – octahedral grain of disulfide of laurite-erlichmanite series with ring zonality; *б* – hexahedral grain of arsenic-containing disulfide of laurite-erlichmanite series with ring zonality, in association with rare PGE sulfoarsenide; *в* – polymorphic grain of arsenic-containing disulfide of laurite-erlichmanite series, with rims of rare PGE sulfoarsenides; *г* – inclusion of rare PGE sulfoarsenide in secondary nickel-rich pentlandite; *δ* – flake of native (telluric) iron with isomorphic admixture of platinum.

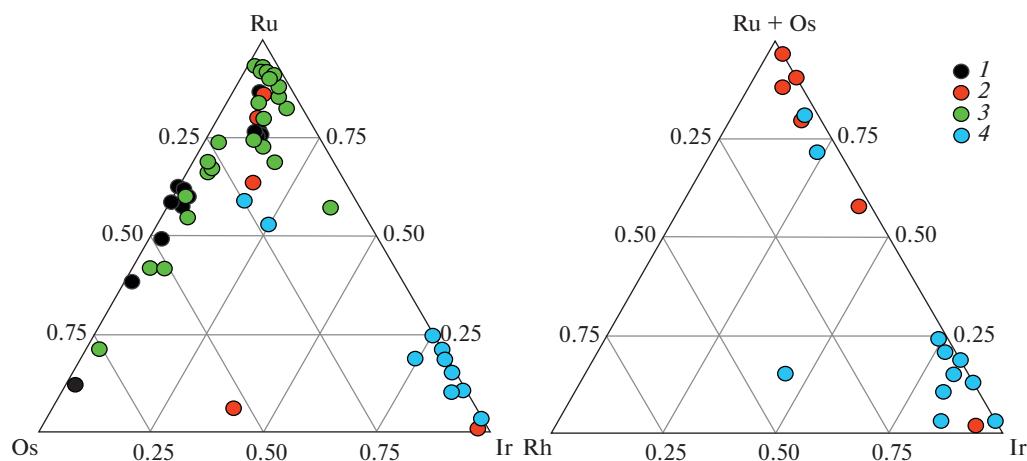
Таблица 2. Химический состав (мас. %) сульфидов редких ЭПГ из хромититов Харчевского массива  
 Table 2. Chemical composition (wt %) of rare PGE sulfides from chromitites in the Kharcheruz massif

Образец	Os	Ir	Ru	Rh	Ni	Cu	Fe	Sb	S	Сумма	Формула
Дисульфиды ряда лаурит–эрлихманит											
K-26/2-13-190	4.28	4.24	51.68	—	1.00	—	—	—	38.00	99.21	$(\text{Ru}_{0.86}\text{Os}_{0.04}\text{Ir}_{0.04}\text{Ni}_{0.03})_{0.97}\text{S}_{2.03}$
K-26/2-11-169	8.00	6.58	46.79	—	1.23	—	—	—	37.21	99.80	$(\text{Ru}_{0.79}\text{Os}_{0.07}\text{Ir}_{0.06}\text{Ni}_{0.04})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
K-26/1-5-71	8.69	7.24	46.74	—	—	—	—	—	36.93	99.60	$(\text{Ru}_{0.80}\text{Os}_{0.08}\text{Ir}_{0.07})_{0.95}\text{S}_{2.05}$
K-26/1-5-73	7.75	6.77	45.71	—	0.72	—	0.57	—	36.74	98.25	$(\text{Ru}_{0.79}\text{Os}_{0.07}\text{Ir}_{0.06}\text{Ni}_{0.02})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
K-26/2-11-171	7.76	6.96	45.61	—	2.12	—	—	—	37.26	99.70	$(\text{Ru}_{0.77}\text{Os}_{0.07}\text{Ir}_{0.06}\text{Ni}_{0.06})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
K-15-5-260	23.05	1.26	39.05	—	—	—	0.64	—	34.82	98.82	$(\text{Ru}_{0.71}\text{Os}_{0.22}\text{Fe}_{0.02}\text{Ir}_{0.01})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
X3 15/4-77	23.89	—	39.54	—	—	—	0.30	—	34.93	98.66	$(\text{Ru}_{0.72}\text{Os}_{0.23}\text{Fe}_{0.01})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
X3 15/4-76	23.83	2.69	38.63	—	—	—	—	—	34.81	100.15	$(\text{Ru}_{0.70}\text{Os}_{0.23}\text{Ir}_{0.03})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
X3 15/4-80	25.49	2.31	37.69	—	—	—	—	—	33.96	99.44	$(\text{Ru}_{0.70}\text{Os}_{0.25}\text{Ir}_{0.02})_{0.97}\text{S}_{2.03}$
X3 15/4-81	26.70	0.87	37.50	—	—	—	—	—	34.99	100.06	$(\text{Ru}_{0.68}\text{Os}_{0.26}\text{Ir}_{0.01})_{0.95}\text{S}_{2.05}$
X3 15/4-78	31.81	1.92	32.63	—	—	—	—	—	33.83	100.19	$(\text{Ru}_{0.61}\text{Os}_{0.32}\text{Ir}_{0.02})_{0.95}\text{S}_{2.05}$
X3 15/4-79	40.26	1.69	25.79	—	—	—	0.08	—	31.72	99.54	$(\text{Ru}_{0.51}\text{Os}_{0.43}\text{Ir}_{0.02})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
K-15-9-296	61.12	2.04	8.69	—	—	—	0.15	—	27.62	99.62	$(\text{Os}_{0.75}\text{Ir}_{0.03}\text{Ru}_{0.20}\text{Fe}_{0.01})_{0.99}\text{S}_{2.01}$
Сульфиды редких ЭПГ и цветных металлов											
K-26/2-9-143	3.48	3.82	44.17	2.35	4.92	—	1.82	1.43	37.27	99.25	$(\text{Ru}_{0.74}\text{Ni}_{0.14}\text{Fe}_{0.05}\text{Rh}_{0.04}\text{Os}_{0.03}\text{Ir}_{0.03})_{0.93}(\text{Sb}_{0.02}\text{S}_{1.93})_{1.97}$
K-26/2-9-145	5.91	4.97	42.75	—	4.74	—	2.34	—	36.60	97.32	$(\text{Ru}_{0.74}\text{Ni}_{0.14}\text{Fe}_{0.07}\text{Os}_{0.05}\text{Ir}_{0.04})_{1.04}\text{S}_{1.96}$
K-26/2-15-197	11.18	9.06	34.06	2.31	7.44	—	—	—	35.62	99.67	$(\text{Ru}_{0.60}\text{Ni}_{0.23}\text{Os}_{0.11}\text{Ir}_{0.08}\text{Rh}_{0.04})_{1.06}\text{S}_{1.94}$
K-26/2-12-183	38.55	29.31	4.27	1.80	—	2.88	0.37	—	22.76	99.95	$(\text{Os}_{0.86}\text{Ir}_{0.65}\text{Cu}_{0.19}\text{Ru}_{0.07}\text{Rh}_{0.07}\text{Fe}_{0.03})_{1.98}\text{S}_{3.02}$
K-26/2-12-182	1.31	60.43	—	3.06	4.17	8.20	2.64	—	19.88	99.70	$(\text{Ir}_{0.51}\text{Cu}_{0.21}\text{Ni}_{0.12}\text{Fe}_{0.08}\text{Rh}_{0.05}\text{Os}_{0.01})_{0.98}\text{S}_{1.02}$

Таблица 3. Химический состав (мас. %) мышьяксодержащих дисульфидов и сульфоарсенидов редких ЭПГ из хромититов Харчерузского массива

Table 3. Chemical composition (wt %) of arsenic-rich disulfides and sulfoarsenides of rare PGE from chromitites in the Kharcheruz massif

Образец	Os	Ir	Ru	Rh	Ni	Fe	As	S	Сумма	Формула	
Мышьяксодержащие минералы ряда лаурит–эрликманит											
K-15-5-255	2.36	2.89	55.30	—	—	1.66	37.58	99.78	(Ru <sub>0.91</sub> Ir <sub>0.03</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.96</sub> (As <sub>0.04</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.04</sub>		
K-15-5-254	3.47	1.28	55.00	—	—	0.85	37.80	98.40	(Ru <sub>0.91</sub> Ir <sub>0.03</sub> Os <sub>0.01</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.03</sub> ) <sub>2.05</sub>		
K-15-5-256	2.53	2.91	54.71	—	—	1.35	36.93	98.44	(Ru <sub>0.92</sub> Ir <sub>0.03</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.03</sub>		
K-15-9-310	1.59	4.83	54.93	—	—	1.00	37.04	99.38	(Ru <sub>0.93</sub> Ir <sub>0.04</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>1.99</sub> ) <sub>2.01</sub>		
K-15-9-312	2.07	4.64	54.66	—	—	1.21	37.53	100.11	(Ru <sub>0.91</sub> Ir <sub>0.04</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.03</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.03</sub>		
K-15-9-309	1.57	5.86	53.69	—	—	0.10	1.56	99.54	(Ru <sub>0.91</sub> Ir <sub>0.05</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>0.04</sub> S <sub>1.98</sub> ) <sub>2.02</sub>		
K-15-9-313	2.38	6.70	52.70	—	—	1.48	36.18	99.44	(Ru <sub>0.90</sub> Ir <sub>0.06</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>0.04</sub> S <sub>1.98</sub> ) <sub>2.02</sub>		
K-15-9-307	5.70	4.39	50.84	—	—	1.65	36.75	99.33	(Ru <sub>0.86</sub> Os <sub>0.05</sub> Ir <sub>0.01</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.04</sub> S <sub>2.01</sub> ) <sub>2.05</sub>		
K-15-9-308	6.29	4.13	51.39	—	—	1.41	36.75	99.97	(Ru <sub>0.87</sub> Os <sub>0.06</sub> Ir <sub>0.04</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.03</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.03</sub>		
K-15-9-311	2.41	9.11	49.70	—	—	0.03	3.06	98.81	(Ru <sub>0.88</sub> Ir <sub>0.09</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.99</sub> (As <sub>0.07</sub> S <sub>1.94</sub> ) <sub>2.01</sub>		
K-15-9-314	6.63	6.58	48.78	—	—	1.68	35.87	99.55	(Ru <sub>0.84</sub> Ir <sub>0.06</sub> Os <sub>0.06</sub> ) <sub>0.96</sub> (As <sub>0.04</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.04</sub>		
K-7/1-61	9.19	7.22	46.11	—	—	1.32	36.15	100.00	(Ru <sub>0.79</sub> Os <sub>0.08</sub> Ir <sub>0.07</sub> ) <sub>0.94</sub> (As <sub>0.03</sub> S <sub>2.03</sub> ) <sub>2.06</sub>		
7-7/1-60	8.61	8.53	45.28	—	—	0.87	36.03	99.31	(Ru <sub>0.79</sub> Os <sub>0.08</sub> Ir <sub>0.08</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.03</sub> ) <sub>2.05</sub>		
K-15-5-258	14.52	2.09	45.02	—	—	0.91	35.66	98.21	(Ru <sub>0.79</sub> Os <sub>0.14</sub> Ir <sub>0.02</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.03</sub> ) <sub>2.05</sub>		
K-15-5-259	17.94	2.34	43.44	—	—	0.18	1.24	100.14	(Ru <sub>0.77</sub> Os <sub>0.17</sub> Ir <sub>0.02</sub> Fe <sub>0.01</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.03</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.03</sub>		
7-7/1-62	8.55	11.49	42.94	—	—	2.80	33.72	99.50	(Ru <sub>0.78</sub> Os <sub>0.08</sub> Ir <sub>0.11</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.07</sub> S <sub>1.96</sub> ) <sub>2.03</sub>		
K-15-5-261	17.77	3.29	41.22	—	—	0.83	0.27	3.01	33.30	99.70	(Ru <sub>0.75</sub> Os <sub>0.17</sub> Ir <sub>0.03</sub> Ni <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> (As <sub>0.08</sub> S <sub>1.93</sub> ) <sub>2.01</sub>
K-15-5-262	18.40	3.20	41.45	—	—	0.48	1.35	34.87	99.75	(Ru <sub>0.74</sub> Os <sub>0.18</sub> Ir <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.03</sub> S <sub>2.00</sub> ) <sub>2.03</sub>	
X <sub>3</sub> 15/4-75	24.10	1.92	37.91	—	—	0.26	0.65	99.56	(Ru <sub>0.68</sub> Os <sub>0.23</sub> Ir <sub>0.02</sub> ) <sub>0.93</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.05</sub> ) <sub>2.07</sub>		
K-15-5-257	25.28	3.99	34.36	—	—	0.78	—	100.37	(Ru <sub>0.63</sub> Os <sub>0.25</sub> Ir <sub>0.04</sub> Ni <sub>0.03</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.06</sub> S <sub>1.90</sub> ) <sub>2.05</sub>		
K-15-9-302	33.72	5.30	27.49	—	—	—	2.30	99.45	99.26	(Ru <sub>0.55</sub> Os <sub>0.36</sub> Ir <sub>0.06</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.06</sub> S <sub>1.97</sub> ) <sub>2.03</sub>	
K-15-9-305	35.86	2.79	26.92	1.81	—	—	0.87	30.60	98.85	(Ru <sub>0.55</sub> Os <sub>0.39</sub> Ir <sub>0.04</sub> Ir <sub>0.03</sub> ) <sub>0.91</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>1.97</sub> ) <sub>1.99</sub>	
K-15-9-295	52.67	2.96	13.83	—	—	0.04	0.76	99.42	(Os <sub>0.60</sub> Ru <sub>0.30</sub> Ir <sub>0.03</sub> ) <sub>0.93</sub> (As <sub>0.02</sub> S <sub>2.05</sub> ) <sub>2.07</sub>		
Сульфоарсениды											
X <sub>3</sub> 15/4-125	15.13	9.92	35.49	1.76	—	0.71	8.41	28.42	99.85	(Ru <sub>0.70</sub> Os <sub>0.16</sub> Ir <sub>0.10</sub> Rh <sub>0.03</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.91</sub> (As <sub>0.23</sub> S <sub>1.76</sub> ) <sub>1.99</sub>	
X <sub>3</sub> 15/4-126	12.90	14.01	30.68	3.25	—	0.69	11.19	26.12	98.85	(Ru <sub>0.63</sub> Ir <sub>0.15</sub> Os <sub>0.14</sub> Rh <sub>0.06</sub> Fe <sub>0.02</sub> ) <sub>0.90</sub> (As <sub>0.31</sub> S <sub>1.69</sub> ) <sub>2.00</sub>	
K-15-9-303	—	46.34	15.30	1.24	—	—	17.44	18.97	99.29	(Ir <sub>0.59</sub> Ru <sub>0.37</sub> Rh <sub>0.03</sub> ) <sub>0.99</sub> (As <sub>0.57</sub> S <sub>1.44</sub> ) <sub>2.01</sub>	
K-15-9-298	—	48.63	13.00	—	—	—	20.18	17.63	99.44	(Ir <sub>0.62</sub> Ru <sub>0.31</sub> ) <sub>0.93</sub> (As <sub>0.66</sub> S <sub>1.41</sub> ) <sub>2.07</sub>	
K-15-9-304	—	49.96	11.34	1.55	—	—	19.35	17.13	99.34	(Ir <sub>0.66</sub> Ru <sub>0.28</sub> Rh <sub>0.04</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>0.65</sub> S <sub>1.37</sub> ) <sub>2.02</sub>	
K-15-9-301	—	50.93	9.39	1.87	—	—	21.36	16.44	99.98	(Ir <sub>0.67</sub> Ru <sub>0.23</sub> Rh <sub>0.05</sub> ) <sub>0.95</sub> (As <sub>0.72</sub> S <sub>1.33</sub> ) <sub>2.05</sub>	
K-7/1-64	—	50.43	6.43	4.58	—	—	21.74	14.33	97.51	(Ir <sub>0.71</sub> Ru <sub>0.17</sub> Rh <sub>0.12</sub> ) <sub>0.90</sub> (As <sub>0.79</sub> S <sub>1.12</sub> ) <sub>2.00</sub>	
K-25-3-319	2.03	22.22	5.41	20.06	5.20	1.97	22.80	20.19	99.89	(Rh <sub>0.42</sub> Ir <sub>0.25</sub> Ni <sub>0.19</sub> Ru <sub>0.11</sub> Fe <sub>0.07</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>1.06</sub> (As <sub>0.65</sub> S <sub>1.29</sub> ) <sub>1.94</sub>	
K-7/1-63	1.72	44.57	5.13	8.58	—	—	24.44	14.04	98.49	(Ir <sub>0.61</sub> Rh <sub>0.22</sub> Ru <sub>0.13</sub> Os <sub>0.02</sub> ) <sub>0.98</sub> (As <sub>0.85</sub> S <sub>1.17</sub> ) <sub>2.02</sub>	
K-15-5-253	—	61.48	2.23	—	—	—	23.96	12.28	99.94	(Ir <sub>0.91</sub> Ru <sub>0.06</sub> ) <sub>0.97</sub> (As <sub>0.91</sub> S <sub>1.12</sub> ) <sub>2.03</sub>	
K-15-5-251	—	60.76	1.88	—	—	—	25.16	11.98	99.77	(Ir <sub>0.89</sub> Ru <sub>0.05</sub> ) <sub>0.94</sub> (As <sub>0.95</sub> S <sub>1.11</sub> ) <sub>2.06</sub>	



**Рис. 4.** Тройные диаграммы составов сульфидов и сульфоарсенидов редких ЭПГ из хромититов Харчкерузского массива.

**Fig. 4.** Triple diagrams of composition of sulfides and sulfoarsenides of rare PGE from chromitites in the Kharcheruz massif.

ниевого минала при увеличении осмивого (рис. 3, *a*–*б*). При этом мышьяксодержащие дисульфиды также нередко образуют зерна с неоднородным составом (рис. 3, *в*).

**Сложные сульфиды редких ЭПГ и цветных металлов.** Данная подгруппа минералов распространена более ограниченно, чем две предыдущих. В минералах этой подгруппы, наряду с платиноидами, в качестве основных компонентов присутствуют никель и медь (рис. 2, табл. 2), а также возрастает роль ирида (до 60.4 мас. %) и появляется примесь родия (до 3.0 мас. %). Данные рентгеноспектрального микроанализа позволяют отнести найденные фазы к трем типам соединений со следующими стехиометрическими соотношениями:  $\text{MeS}$ ,  $\text{MeS}_2$  и  $\text{Me}_2\text{S}_3$ . Ранее подобные минералы выявлены и широко охарактеризованы в хромитовых рудах Кемпирского массива (Дистлер и др., 2003; Юричев и др., 2019).

**Сульфиды цветных металлов, содержащие ЭПГ.** К этой подгруппе отнесены никелистый пентландит и борнит (рис. 2). Платиновые металлы в составе этих фаз являются примесными компонентами, суммарное количество которых не превышает 9.5 мас. %

**Таблица 4.** Химический состав (мас. %) вторичных сульфидов цветных металлов, содержащих примесь ЭПГ, из хромититов Харчкерузского массива

**Table 4.** Chemical composition (wt %) of secondary sulphides of non-ferrous metals, containing minor PGE, from chromitites in the Kharcheruz massif

Образец	Os	Ir	Ru	Rh	Pd	Ni	Cu	Fe	As	S	Сумма
Борнит											
K-26/2-17-206	–	3.93	–	–	0.64	5.37	59.29	7.17	1.40	22.20	100.01
K-26/2-17-207	–	4.71	–	–	–	4.52	59.90	6.71	1.79	21.82	99.44
Пентландит											
K-26/2-9-146	0.56	0.19	6.95	1.11	–	44.14	–	16.00	–	29.40	98.35
K-26/2-9-147	–	–	5.84	–	–	45.59	–	16.86	–	30.55	98.83
K-26/2-9-148	0.42	1.99	7.15	–	–	44.04	–	16.59	–	29.71	99.89

в пентландите и 4.7 мас. % в борните. При этом отмечается совершенно определенная селективность концентрирования ЭПГ в этих фазах. Установлено, что в никелистом пентландите концентрируются только редкие ЭПГ (Os, Ir, Ru) при доминирующей роли рутения, а в борните – только иридий и в существенно меньшей степени палладий (табл. 4). В составе борнита постоянно отмечается примесь никеля.

**Сульфоарсениды редких ЭПГ.** Состав этих фаз определяется достаточно широкой смесимостью трех конечных миналов – ирарсита, руарсита и осарсита, хотя базовыми составами являются только два из них – иридиевый и рутениевый миналы (табл. 3, рис. 4). Наиболее контрастные по составу фазы: почти чистый ирарсит ( $\text{Ir}_{0.91}\text{Ru}_{0.06}\text{As}_{0.91}\text{S}_{1.12}$ )<sub>2.03</sub> и максимально богатый рутением состав ( $\text{Ru}_{0.70}\text{Os}_{0.16}\text{Ir}_{0.10}\text{Rh}_{0.03}\text{Fe}_{0.02}$ )<sub>1.01</sub>( $\text{As}_{0.23}\text{S}_{1.76}$ )<sub>1.99</sub>. В сульфоарсенидах существенно возрастает содержание родия (до 20.1 мас. %). Отмечено, что по мере увеличения доли мышьяка в лигандной группировке As–S в составе сульфоарсенидов происходит увеличение содержания иридиевого минала и уменьшение – рутениевого.

## О ГЕНЕЗИСЕ ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ХРОМИТОВЫХ РУДАХ

В разномасштабных хромитовых проявлениях в ультрамафитовых массивах различных регионов мира практически всегда присутствует акцессорная минерализация ЭПГ. В хромититах ультрамафитовых массивов Полярноуральского региона по своей специализации выявлена платиноидная минерализация преимущественно двух типов: Ir–Os–Ru и Pt–Pd–(Au) (Гурская и др., 2004). При этом отмечено, что первый тип в основном связан с вкрапленными хромитовыми рудами высокохромистого магнезиального состава, а второй – ассоциирует с крупнозернистыми дунитами, содержащими редкую вкрапленность высокожелезистых хромитов, либо развивается в пироксенитах и габброидах “полосчатого” комплекса вместе с мелкими выделениями сульфидов и сульфоарсенидов железа, никеля и меди.

Проведенные исследования в средне- и густовкрапленных хромититах Харчерузского массива подтвердили ранее сделанные выводы и позволили выявить только платиноидную минерализацию первого типа, локализованную в высокохромистых хромшпинелидах в виде сингенетических микровключений минералов тугоплавких платиноидов (Os–Ir–Ru). При широком развитии сульфидов и сульфоарсенидов редких ЭПГ не удалось обнаружить ни одного включения металлических твердых растворов ЭПГ, являющихся наиболее обычными и хорошо изученными минералами хромитовых месторождений и проявлений, связанных с оливиновыми комплексами. Подобный факт авторы склонны связывать с высокой фугитивностью серы при формировании хромитовых руд и сингенетичных с ними минералов редких ЭПГ (Кривенко и др., 2002; Кривенко и др., 2005; Юричев, Чернышов, 2019), что также подтверждается широко представленной в харчерузских хромититах акцессорной минерализацией сульфидов цветных металлов.

Концентрирование редких ЭПГ и хромшпинелидов, по-видимому, было связано с мобилизацией платиноидов и хрома из несмесимой рудно-силикатной жидкости, отделившейся от большого объема “материнского” лерцолитового субстрата (содержащего редкие ЭПГ в состоянии рассеяния) в результате его частичного плавления. Дальнейшая судьба тугоплавких ЭПГ, очевидно, определялась их концентрированием совместно с другими компонентами (Fe, Ni, Cu и др.), не участвующими в процессе образования хромититов, и последующим отложением из высоконасыщенных надкритических флюидов. Повсеместное присутствие минералов редких ЭПГ в виде сингенетических микровключений в хромшпинелидах доказывает существование определенных общих условий концентрирования платиноидов и хрома (Талхаммер, 1996; Zhou et al., 1996; Melcher et al., 1997).

Обращает на себя внимание и многоэтапность процесса формирования ассоциации выявленных в ходе исследования минералов ЭПГ. Наиболее ранними являются преимущественно фракционирующие рутений дисульфиды ряда лаурит–эрликманит. Остальные выявленные минералы ЭПГ (мышьяксодержащие дисульфиды, сложные сульфиды редких ЭПГ и цветных металлов, сульфиды цветных металлов, содержащие ЭПГ, сульфоарсениды и единичное зерно теллурического железа с платиной) авторы склонны связывать с более поздними изменениями первичных минералов платиновых металлов. Эти события, вероятно, могли быть вызваны мантийным метасоматозом, когда при воздействии восходящих восстановленных флюидов мантийного происхождения происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ (Garuti, Zaccarini, 1997; Melcher et al., 1997; Ahmed, Arai, 2003; Киселева и др., 2014). На восстановительную природу таких флюидов указывают находки в составе харчерузских хромититов самородных железа и серебра, а также вторичных Cu–Ni–Fe сульфидов с примесью редких ЭПГ (Смирнова, 1970; Bezmen et al., 1991).

## ВЫВОДЫ

1. В средне-густовкрапленных хромититах Харчерузского массива, впервые выявлены и изучены сульфиды и сульфоарсениды ЭПГ. Отсутствие типичных для хромитовых руд металлических твердых растворов Os–Ir–Ru в составе проанализированных образцов указывает на повышенную фугитивность серы при низкой фугитивности кислорода в момент формирования хромитовых руд и сингенетичных с ними минералов редких ЭПГ. Этот вывод подтверждается широким развитием в харчерузских хромититах акцессорных сульфидов цветных металлов.

2. Дисульфиды ряда лаурит–эрликманит образуют практически непрерывную серию с преобладанием рутениевого минала и “сквозным” присутствием иридия (до 7.2 мас. %). В отдельную подгруппу в составе этих дисульфидов выделены мышьяксодержащие (до 3.1 мас. %) разновидности, главной особенностью которых является замещение в лигандной группировке части серы мышьяком, что делает эти минералы переходными к достаточно распространенным сульфоарсенидным фазам. Для минералов обоих подгрупп характерна низкая растворимость цветных металлов кроме никеля.

3. Сульфиды редких ЭПГ и цветных металлов обнаруживают тенденцию к фракционированию в основном иридия, родия, никеля и меди и характеризуются различным соотношением металл–сера:  $\text{MeS}$ ,  $\text{Me}_2\text{S}_2$  и  $\text{Me}_2\text{S}_3$ .

4. В группе сульфоарсенидов наиболее распространены соединения на основе иридия при повышенной роли родия. Нередко в этих минералах полностью отсутствует осмий.

5. Оценивая эволюционную направленность фракционирования редких ЭПГ в хромититах Харчерузского массива, можно прийти к выводу, что в дисульфидах доминирует фракционирование рутения (в основном) и осмия; в сложных сульфидах редких ЭПГ с цветными металлами наряду с рутением и осмием возрастает активность иридия и родия; в сульфоарсенидах – иридий и родий занимают ведущую роль в составе соединения при минимальных содержаниях (либо полном отсутствии) осмия и рутения.

6. Главным фактором формирования платиноидной минерализации является флюидная мобилизация. Наиболее ранними являются дисульфиды ряда лаурит–эрликманит. Остальные выявленные в настоящей работе минералы ЭПГ связаны с более поздними изменениями первичных дисульфидов, вызванными мантийным метасоматозом, когда при воздействии восстановленных флюидов мантийного происхождения, обогащенных S и As и несущих такие элементы, как Ni, Cu, Rh и Pd, происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбантев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., 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 // Геол. рудн. месторождений. 2003. Т. 45. № 1. С. 44–74.

Додин Д.А., Ланда Э.А., Лазаренков В.Г. Платинометалльные месторождения мира. Т. 2. Платиносодержащие хромитовые и титаномагнетитовые месторождения. М.: ООО “Геоинформцентр”, 2003. 409 с.

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

Кривенко А.П., Подлинский М.Ю., Кубышев А.И., Катанов С.Г. Перспективы хромитоносности и платиноносности гипербазитов Верхнеамыльского района в Западном Саяне / Минеральные ресурсы Красноярского края. Красноярск: РИЦ КНИГИМС, 2002. С. 314–324.

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

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

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

Смирнова Т.А. Теллурическое железо в ультраосновных породах Кемпирсайского плутона // ЗВМО. 1970. № 6. С. 745–748.

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

Чернышов А.И., Юричев А.Н. Структурная эволюция дунитов и хромитов Харчерузского массива (Полярный Урал) // Геотектоника. 2016. № 2. С. 62–77.

Юричев А.Н., Чернышов А.И. Хромититы Харчерузского блока массива Сыум-Кей: вещественный состав и генезис руд (Полярный Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 6–16.

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

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

**Platinum-Bearing of Chromitites in the Kharcheruz Ultramafic Massif  
(the Polar Urals): New Data**

A. N. Yurichev<sup>a</sup>, \*, A. I. Chernyshov<sup>a</sup>, and E. V. Karbovyak<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

\*e-mail: juratur@sibmail.com

In chromitites of the Kharcheruz ultramafic massif, which is part of the Khadatinsky ophiolite belt that closes ophiolite complexes of the Polar Urals in north, small inclusions of minerals of rare platinum-group elements (PGE) (ruthenium, osmium, and iridium): sulfides and sulfoarsenides were first discovered. The complete absence of Os–Ir–Ru metallic solid solutions (typical for chromite ores) in composition of analyzed samples, indicates an increased fugacity of sulfur with low fugacity of oxygen at time of formation of chromite ores and syngenetic minerals of rare PGE. The evolutionary direction of rare PGE fractionation

in chromitites of the Kharcheruz massif is noted: ruthenium and osmium fractionation dominates in disulphides, in complex sulphides of rare PGE with non-ferrous metals (MeS, MeS<sub>2</sub>, and Me<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) iridium and rhodium increase along with ruthenium and osmium, in sulfoarsenides – iridium and rhodium take leading role in composition of compound with minimal (or complete absence) osmium and ruthenium. The process of forming associations of identified rare PGE minerals occurred in several stages. Earliest are disulfides of laurite-erlichmanite series (mainly fractionation of ruthenium). The remaining sulfides and sulfoarsenides of rare PGE belong to later formations and associated with processes of mantle metasomatism, when under influence of reduced fluids, enriched S and As and bearing such elements as Ni, Cu, Rh, and Pd, processes of remobilization and redeposition of PGE are occurred.

**Keywords:** Polar Urals, ophiolites, Kharcheruz massif, chromitites, PGE minerals, chemical composition, genesis

## REFERENCES

- Ahmed A.H., Arai S.* Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 597–616.
- Bezmen N.I., Brugmann G.E., Naldrett A.J.* Mechanism of concentration of platinum group elements: partitioning between silicate and sulfide melts. *Intern. Geol. Rev.* **1991**. Vol. 33. N 8. P. 784–792.
- Chernyshov A.I., Yurichev A.N.* Structural evolution of dunites and chromites of the Kharcheruz massif (The Polar Urals). *Geotectonics*. **2016**. N 2. P. 62–77.
- 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.
- Dodin D.A., Landa E.A., Lazarenkov V.G.* Platinum metal deposits of the world. Vol. 2. Platinum-containing chromite and titanomagnetite deposits. Moscow: Geoinformtsentr LLC, **2003**. 409 p. (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.
- 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).
- Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Agafonov L.V., Belyanin D.K., Damdinov B.B.* Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoi and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 2. P. 259–272.
- Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Kubyshev A.I., Katanov S.G.* Prospects of chromite-bearing and platinum-bearing of hyperbasites of Upper-Amul region in the Western Sayan. In: *Mineral resources of Krasnoyarsk region*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, **2002**. P. 314–324 (in Russian).
- Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Agafonov L.V.* Ore mineralization of hyperbasites of Ergaksky massif and prospects for its chromite-bearing. In: *Condition and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Geoecology of natural environment and society. Issue 8*. Kyzyl: Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, **2005**. P. 32–44 (in Russian).
- Legendre O., Auge T.* Mineralogy of platinum-group mineral inclusions in chromites from different ophiolitic complexes. In: *Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks*. London: Inst. Mining and Metallurgy, **1986**. P. 361–372.
- Malich K.N., Badanina I.Yu., Knauf V.V., Meisel T.* Mineralogical-geochemical associations of platinoids of dunite-garzburgite and clinopyroxenite-dunite massifs. *Proc. Inst. Geol. Geochem. UB RAS*. **2013**. Vol. 160. P. 255–260 (in Russian).
- Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpf 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.
- Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by example of the Polar Urals and the Western Sayan).* Ed. by Sobolev V.S., Dobretsov N.L. Novosibirsk: Nauka, **1977**. 222 p. (in Russian).
- Smirnova T.A.* Telluric iron in ultrabasic rocks of the Kempirsai pluton. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1970**. N 6. P. 745–748 (in Russian).

*Thalhammer T.V.* Associations of PGE minerals in massive chromite ores of the Kempirsai ophiolitic complex (the Southern Urals): evidence for mantle metasomatism. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1986**. N 1. P. 25–36 (in Russian).

*Yurichev A.N., Chernyshov A.I.* Chromitites of Kharcheruz block of the Syum-Keu massif: material composition and ore genesis (The Polar Urals). *Bull. Tomsk Polytech. Univer. Geo Assets Engin.* **2016**. Vol. 327. N 8. P. 6–16 (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.* Platinum-bearing of chromitites from the Kurtushibinsky ophiolite belt, Western Sayan: new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. N 5. P. 113–125 (in Russian).

*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.