

© А. Н. ЮРИЧЕВ, А. И. ЧЕРНЫШОВ

ПЛАТИНОНОСНОСТЬ ХРОМИТИТОВ КУРТУШИБИНСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА, ЗАПАДНЫЙ САЯН: НОВЫЕ ДАННЫЕ

Томский государственный университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 36;
e-mail: juratur@sibmail.com

В хромититах из Эргакского и Калнинского ультрамафитовых массивов, являющихся крайними северо-восточными фрагментами Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна, обнаружены мелкие зерна минералов элементов платиновой группы (ЭПГ). Впервые в составе хромититов Эргакского массива диагностированы твердый раствор Cu—Ru—Os, мышьяксодержащий (As до 3.6 мас. %) лаурит с примесью Pt, Ni и Co, сульфиды ЭПГ типа MeS и Me₃S₄, а также сульфоарсенид с высоким содержанием Rh (12.7 мас. %), в хромититах Калнинского массива — лаурит и сульфоарсениды. Особенности химического состава минералов платиноидов указывают на высокую температуру образования Ru—Os сульфидов (1200—1250 °C) обоих массивов, а также на высокое парциальное давление серы при формировании хромитовых руд и сингенетичных с ними минералов ЭПГ Эргакского массива. Процесс формирования ассоциаций выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru и дисульфиды ряда лаурит-эрликманит (преимущественно фракционирующие рутений), наиболее поздними — металлические твердые растворы Cu—Ru—Os, сульфиды состава (Ru,Fe)₃S₄, (Ru,Ni,Fe)S и сульфоарсениды ЭПГ, образование которых происходило под воздействием восстановленных флюидов, способствовавших ремобилизации и переотложению ЭПГ.

Ключевые слова: хромититы, минералы ЭПГ, офиолиты, Западный Саян.

A. N. YURICHEV, A. I. CHERNYSHOV. PLATINUM-BEARING OF CHROMITITES
FROM THE KURTUSHIBINSKY OFIOLITE BELT, WESTERN SAYAN: NEW DATA

Tomsk State University, Tomsk, Russia

Small scattered grains of PGE minerals have been found in chromitites of Ergaksky and Kalninsky ultramafic massifs, which are extreme northeastern fragments of the Kurtushibinsky Ophiolite Belt of Western Sayan. For the first time, together with previously known PGE minerals, there were found the Cu—Ru—Os solid solution, arsenic-bearing (As up to 3.6 wt %) laurite with minor Pt, Ni, and Co, PGE sulfides of MeS and Me₃S₄ types, sulfoarsenide with the high content of Rh (~12.7 wt %) in chromitites of the Ergaksky massif, and laurite and sulfoarsenides in chromitites of the Kalninsky massif. Compositions of PGE minerals indicate high temperature of the Ru—Os sulfide formation (~1200—1250 °C) in both massifs, as well as high partial pressure of sulfur under the formation of chromitites and syngenetic PGE minerals in the Ergaksky massif. PGE mineral assemblages were formed in several stages. Os—Ir—Ru solid solutions and disulfides of the laurite—erlichmanite series (mainly fractionating ruthenium) formed earlier than Cu—Ru—Os solid solutions, sulfides (Ru,Fe)₃S₄, (Ru,Ni,Fe)S, and PGE sulfoarsenides, which crystallized under influence of reduced fluids as a result of remobilization and redeposition of PGE.

Key words: chromitites, PGE minerals, ophiolites, Western Sayan.

В хромитовых рудах полиформного типа, приуроченных к дунит-гарцбургитовым массивам офиолитовых поясов, практически во всех случаях присутствуют минералы элементов платиновой группы (ЭПГ), которые характеризуются резким преобладанием более тугоплавких Os, Ir, Ru над Pd, Pt, Rh (Legendre, Auge, 1986; Додин и др., 2003; Малич и др., 2013).

Метаморфические ультрамафиты Куртушибинского офиолитового пояса залегают среди метаморфизованных осадочно-вулканогенных венд-кембрийских отложений в северо-восточной части Западного Саяна (Петрология., 1977; Волкова и др., 2009). Их массивы наблюдаются в виде многочисленных тектонических блоков и пластин, окруженных серпентинитовым меланжем и образующих цепочки, вытянутые в ЮЗ—СВ направлении. Объектом настоящего исследования являются Эргакский и Калнинский хромитоносные массивы, слагающие крайние северо-восточные фрагменты офиолитового пояса (рис. 1). Они образованы пластически деформированными ультрамафитами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса.

Среди ультрамафитов обоих массивов ранее были выявлены рудопроявления хромититов и проведена их прогнозная оценка (Забияка, 2008; Лоскутов и др., 2015; Чернышов и др., 2018). В хромитовых рудах и в шлиховых пробах аллювия, сопряженного с этими массивами, открыта и изучена платиноидная минерализация (Кривенко и др., 2002; 2005; Подлипский, Кривенко, 2005). По составу она может быть разделена на два типа: Os—Ir—Ru и Pt—Pd—Rh. В Эргакском массиве минералы ЭПГ первого типа представлены исключительно сульфидами ряда лаурит (RuS_2)—эрликманит (OsS_2) со значительным преобладанием лауритового минерала, минералы второго типа (обнаруженные только в шлихах из аллювия) — медистой ферроникельплатиной Pt(Fe,Ni,Cu), туламинитом Pt_2FeCu и звягинцевитом Pd_3Pb . В Калнинском массиве в составе первого типа выявлены только металлические твердые растворы Os—Ir—Ru; второй тип представлен здесь более широко (свыше 15 минералов ЭПГ, среди которых преобладают соединения Pt и Fe) и включает сперилит PtAs_2 , изоферроплатину Pt_3Fe , тетраферроплатину Pt_4Fe , туламинит Pt_2FeCu , железистую платину, мертиит Pd_8Sb_3 , маякит PdNiAs , сплавы Pt—Fe—Cu и Cu—Pd, холлингвортит RhAsS , неназванный арсенид RhNiAs и др.

При изучении хромшинелидов из вкрапленных и сливных хромититов обоих массивов авторами были выявлены и диагностированы микроскопические включения минералов платиноидов. На основании выполненных исследований проведена химическая типизация установленных минеральных фаз, рассмотрены условия и механизмы их образования.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Калнинский массив имеет субизометричную форму (рис. 1), его площадь составляет примерно 35 км^2 (Еханин, 2010; Чернышов, Юричев, 2013). Он сложен ультрамафитами дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса. Северо-восточная часть массива представлена, главным образом, дунитами, в юго-западной части наблюдается чередование дунитов и преобладающих гарцбургитов. Все породы претерпели интенсивные пластические деформации. К дунитам приурочены вкрапленные хромититы полосчатого строения, обусловленного различной концентрацией хромшинелидов (Чернышов, Юричев, 2013; Юричев, 2015; Чернышов и др., 2016). Зоны хромититов имеют линейную форму и северо-западное простирание, согласное с полосчатой структурой массива. В краевых частях массива дуниты и гарцбургиты часто преобразованы в серпентиниты.

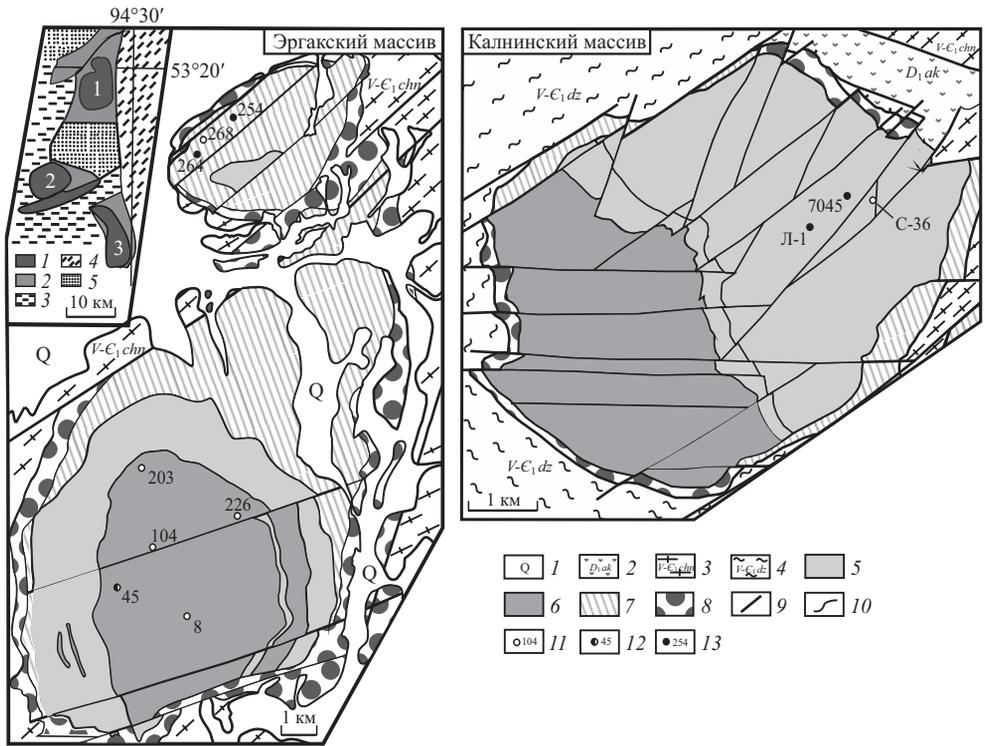


Рис. 1. Схема геологического строения Калнинского и Эргакского ультрамафитовых массивов и их положение в структуре Куртушибинского офиолитового пояса (по: Кривенко и др., 2002; Чернышов, Юричев, 2013, с дополнениями авторов).

1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — нижнедевонская актуругская свита: андезиты, трахиандезиты, лава- и пирокластиты, реже трахиандезитобазальты, андезитобазальты, базальты; 3 — венд-нижнекембрийская чингинская серия: базальты, трахибазальты, глинисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые, хлорит-кремнистые сланцы, микрокварциты, прослои и линзы металевролитов, метапесчаников, метагравелитов, метаконгломератов; 4 — венд-нижнекембрийская джебашская серия: metabазальты, метаморфические сланцы кварцевые, серицит-альбит-кварцевые, хлорит-альбит-кварц-карбонатные, серицит-хлорит-кварц-альбитовые, прослои и линзы мраморов, кальцифиров; 5 — дуниты; 6 — гарцбургиты; 7 — серпентиниты, серпентинизированные ультрамафиты нерасчлененные; 8 — серпентинитовый меланж; 9 — разрывные нарушения, разломы; 10 — геологические границы; 11–13 — участки отбора образцов хромититов: 11 — минералы ЭПГ не обнаружены, 12 — минералы ЭПГ не обнаружены авторами, но ранее диагностированы предшественниками (Кривенко и др., 2005), 13 — выявлена ЭПГ минерализация.

На врезке — схема строения Куртушибинского офиолитового пояса в северо-восточной части Западного Саяна (по: Подлипский, Кривенко, 2005).

1 — ультрамафитовые массивы (1 — Эргакский, 2 — Калнинский, 3 — Кызыр-Бурлюкский); 2 — вулканогенно-осадочные толщи: metabазальты, плагиоиролиты, сланцы кремнистые, углистые, глаукофановые; 3–5 — каледонские складчатые системы (3 — Западно-Саянская, 4 — Хемчикско-Систигхемская; 5 — среднепалеозойские впадины).

Fig. 1. Schematic geological map of Ergaksky and Kalninsky ultramafic massifs and their position in structure of the Kurtushibinsky ophiolite belt (after Krivenko et al., 2002; Chernyshov, Yurichev, 2013 with modifications of authors).

In the inset is the scheme of Kurtushibinsky ophiolite belt in the north-eastern part of Western Sayan (after Podlipsky, Krivenko, 2005).

Эргакский массив находится в 11 км от Калнинского. В плане он имеет форму овала размером 14 × 8 км, вытянутого в субмеридиональном направлении. Субширотным разломом массив разделен на два разновеликих блока: южный Лысанский (75 км²) и северный Малоэргакский (10 км²). В строении Лысанского блока принимают участие ультрамафиты дунит-гарцбургитового

полосчатого комплекса. Он сложен ритмично переслаивающимися дунитами и гарцбургитами, которые претерпели интенсивные пластические деформации (Чернышов и др., 2018). В Малоэргакском блоке дуниты и гарцбургиты нередко преобразованы в регенерированные серпентин-оливиновые метаультрамафиты и оливиниты. Зоны хромититов приурочены к дунитам и оливинитам и залегают согласно с полосчатостью. Их структура варьирует от густовкрапленной до сливной (массивной). По периферии обоих блоков значительным распространением пользуются серпентиниты.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рудные минералы изучались с помощью оптического микроскопа. Их химический состав анализировался с помощью электронных микроскопов TESCAN Vega 3 SBH, 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, токе 15 нА и времени набора спектра 120 с. Диаметр пучка зонда 1—2 мкм. В качестве стандартов для определения содержания Pt, Ir, Os, Rh, Ru и Co в минералах были применены чистые металлы, содержания Fe и S — пирротин, Ni — миллерит, Cu — халькопирит, As — сперрилит. Для анализов на минералы платиновой группы использованы аналитические линии: L α для Pt, Ir, Rh, Ru; K α для S, Fe, Ni, Cu, As; M α для Os. Все анализы выполнены в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ЭПГ В ЗОНАХ ХРОМИТИТОВ

И в Эргакском, и в Калнинском массивах минералы ЭПГ были установлены только в густовкрапленных хромититах, тогда как в сливных и вкрапленных их разновидностях, а также в аксессуарных хромшпинелидах из дунитов и гарцбургитов они не были обнаружены. Минералы платиноидов наблюдаются преимущественно в виде изолированных зерен таблитчатого облика размером до 7 мкм во внутренних частях зерен хромшпинелидов, отвечающих по химическому составу хромиту (табл. 1). Нередко они образуют близкие к идиоморфным пятигранные или шестигранные (реже — квадратные) сечения (рис. 2).

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ЭПГ

Исследование состава включений позволило выделить три основные группы минералов платиноидов: металлические твердые растворы, сульфиды и сульфоарсениды ЭПГ. Вторая и третья группы минералов характеризуется более широким распространением в изученных образцах.

Металлические твердые растворы относятся к двум системам: Ir—Os—Ru и Cu—Ru—Os (рис. 2, а, б). Первая система выявлена в хромититах Калнинского массива и характеризуется резким преобладанием Ir над Os при минимальных содержаниях Ru (табл. 2), что хорошо согласуется с более ранними данными (Кривенко и др., 2002). Эта система является наиболее обычной и

Химический состав (мас. %) хромититов Эргакского и Калнинского массивов
Chemical composition (wt %) of chromitites in Ergaksky and Kalninsky massifs

Образец	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO _{tot}	Сумма
<i>Эргакский массив</i>							
Эр8-5-3	13.06	22.37	—	—	49.09	15.48	100
Эр8-8-2	15.85	22.76	—	—	47.83	13.56	100
Эр8-12-2	14.88	22.52	—	—	48.04	14.57	100.01
Эр43-2-2	14.12	22.06	—	—	48.98	14.83	99.99
Эр43-3-2	15.19	21.56	0.37	—	48.51	14.37	100
Эр43-6-2	12.52	22.00	—	—	49.50	15.98	100
Эр43-10-2	13.34	22.00	0.35	—	48.65	15.67	100.01
Эр104-7-1	13.15	20.51	—	—	47.85	18.49	100
Эр104-8-2	12.85	18.8	—	—	49.82	18.53	100
Эр104-9-3	13.70	19.00	—	—	50.38	16.93	100.01
Эр203-2-2	14.05	10.08	—	—	62.04	13.83	100
Эр203-4-2	13.99	9.78	—	—	61.61	14.62	100
Эр203-5-2	13.71	10.06	—	—	61.81	14.43	100.01
Эр265-1-3	10.53	9.77	—	—	58.07	21.63	100
Эр265-2-3	13.10	10.06	—	0.88	57.94	18.01	99.99
Эр265-3-2	11.57	9.75	—	0.85	57.55	20.28	100
Эр265-5-4	13.60	10.39	—	1.05	57.71	17.24	99.99
Эр268-1-2	9.88	6.35	—	—	63.65	20.12	100
<i>С включениями минералов ЭПГ</i>							
Эр254-10-2	11.67	8.08	—	—	62.28	17.97	100
Эр254-10-3	11.57	8.25	—	—	61.86	18.32	100
Эр254-10-4	10.64	7.98	—	—	62.23	19.15	100
Эр254-10-6	11.69	8.27	—	—	61.85	18.19	100
Эр264-3-2	10.00	6.74	—	—	61.36	21.89	99.99
Эр264-4-3	12.65	5.79	—	1.15	62.84	17.02	99.45
Эр264-5-2	9.35	6.86	—	—	60.71	23.08	100
Эр264-7-2	10.93	6.98	—	0.88	60.96	20.25	100
<i>Калнинский массив</i>							
С-36-271-1-2	10.8	8.60	—	—	60.85	19.74	99.99
С-36-271-2-2	10.86	8.96	—	—	60.23	19.95	100
С-36-271-4-2	10.72	8.74	—	—	60.57	19.98	100.01
С-36-271-5-2	10.28	8.85	—	—	60.50	20.36	99.99
<i>С включениями минералов ЭПГ</i>							
7045-1-2	11.35	7.80	—	—	62.05	18.80	100
7045-2-3	10.65	7.76	—	—	62.74	18.86	100.01
7045-3-2	11.37	7.66	—	—	62.22	18.75	100
7045-6-2	11.32	7.37	—	—	62.78	18.52	99.99
Л1-1-2	13.97	11.99	—	—	60.32	13.71	99.99
Л1-2-2	13.87	11.46	—	—	61.08	13.60	100.01
Л1-4-2	12.93	10.53	—	—	61.56	14.98	100
Л1-8-2	13.41	12.07	—	—	60.38	14.14	100

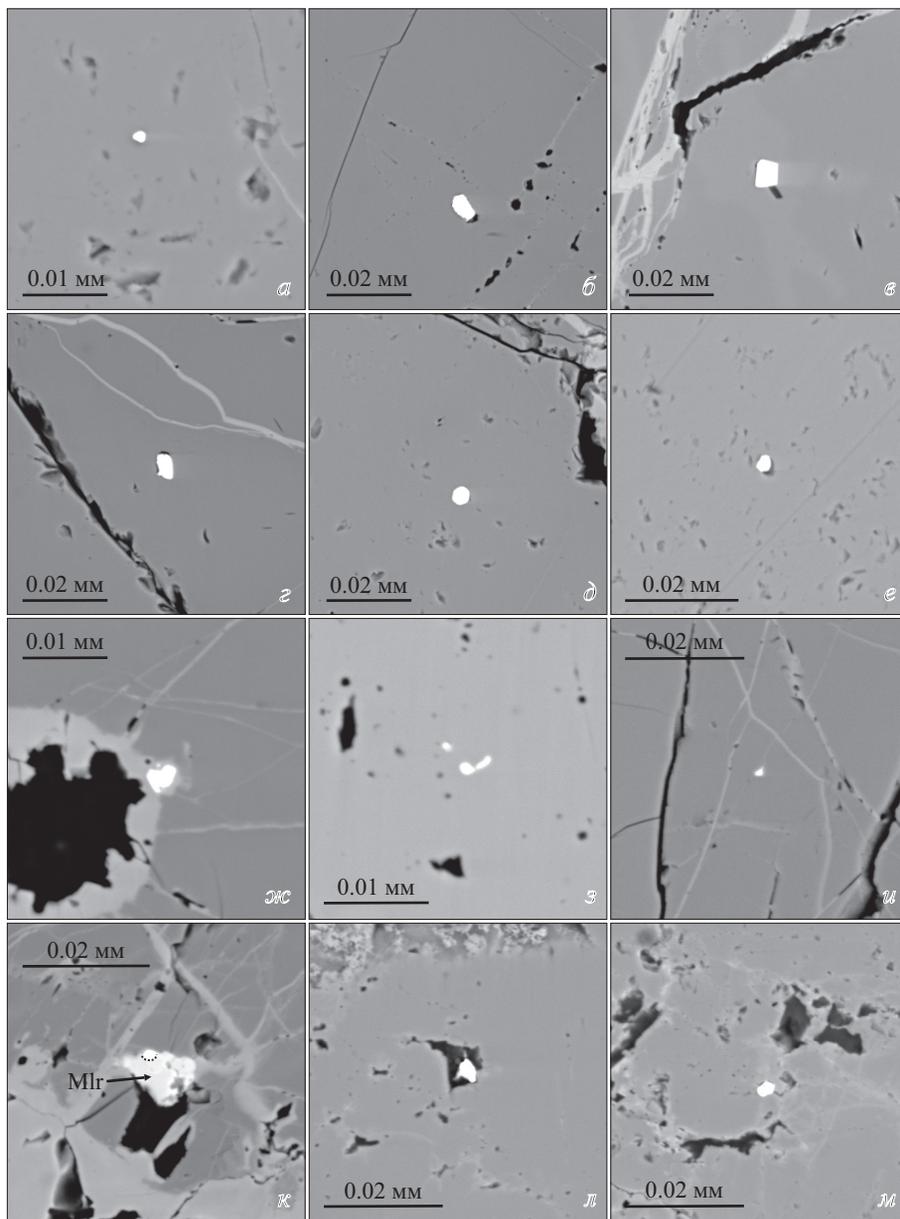


Рис. 2. Микрофотографии зерен минералов ЭПГ в хромитовой матрице массивных хромититов Эргакского и Калининского массивов. Фото в отраженных электронах.

a — металлический твердый раствор Os—Ir—Ru, Калининский массив; *б* — металлический твердый раствор Cu—Ru—Os, Эргакский массив; *в* — дисульфид ряда лаурит—эрликманит, Эргакский массив; *г*, *д* — лаурит, Эргакский массив; *е* — лаурит, Калининский массив; *ж*, *з* — мышьяк содержащий лаурит с примесью Pt, Ni и Co, Эргакский массив; *и* — сульфид состава $(Ru,Fe)_3S_4$, Эргакский массив; *к* — сульфоарсенид с высоким содержанием родия (12.7 мас. %) в ассоциации с миллеритом (Mlr), Эргакский массив; *л*, *м* — сульфоарсениды, Калининский массив.

Fig. 2. Grains of PGE minerals in chromite matrix of massive chromitites of Ergaksky and Kalninsky massifs. BSE image.

Химический состав (мас. %) минералов ЭПГ из хромититов Эргакского и Калининского массивов
 Chemical composition (wt %) of PGE minerals from chromitites of Ergaksky and Kalinsky massifs

Образец	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Cu	Ni	Co	Fe	As	Sb	S	Сумма	Формула
Эр264-5-1	2.90	—	19.98	—	—	76.38	—	—	—	—	—	—	99.25	$(\text{Cu}_{0.85}\text{Ru}_{0.14}\text{Os}_{0.01})_{1.00}$
Эргакский массив														
Фазы системы Cu—Ru—Os														
Дисульфиды ряда лаурит—эрликманит														
Эр254-5-1	28.97	8.53	30.28	—	—	—	—	—	—	—	—	31.42	99.21	$(\text{Ru}_{0.61}\text{Os}_{0.31}\text{Ir}_{0.09})_{1.01}\text{S}_{1.99}$
Эр264-3-1	9.94	—	52.20	—	—	—	—	—	—	—	—	37.44	99.58	$(\text{Ru}_{0.88}\text{Os}_{0.09}\text{h}_{0.97}\text{S}_{2.03})$
Эр264-2-6-1	9.78	—	51.95	—	—	—	—	—	—	—	—	36.74	98.47	$(\text{Ru}_{0.89}\text{Os}_{0.09}\text{h}_{0.98}\text{S}_{2.02})$
Эр264-2-7-1	3.49	4.75	54.36	—	—	—	—	—	—	—	—	37.12	99.73	$(\text{Ru}_{0.92}\text{Ir}_{0.04}\text{Os}_{0.03}\text{h}_{0.99}\text{S}_{2.01})$
Эр264-2-8-1	3.93	—	57.80	—	—	—	—	—	—	—	—	38.41	100.14	$(\text{Ru}_{0.95}\text{Os}_{0.03}\text{h}_{0.98}\text{S}_{2.02})$
Эр264-2-9-1	5.51	—	55.84	—	—	—	—	—	—	—	—	37.38	98.74	$(\text{Ru}_{0.94}\text{Os}_{0.05}\text{h}_{0.99}\text{S}_{2.01})$
Эр264-2-3-1	2.04	—	59.46	—	—	—	—	0.26	—	—	—	38.43	100.19	$(\text{Ru}_{0.98}\text{Os}_{0.02}\text{Fe}_{0.01}\text{h}_{1.01}\text{S}_{1.99})$
Эр264-2-3-2	2.20	—	58.59	—	—	—	—	0.41	—	—	—	38.29	99.5	$(\text{Ru}_{0.97}\text{Os}_{0.02}\text{Fe}_{0.01}\text{h}_{1.00}\text{S}_{2.00})$
Мышьяксодержащие минералы системы лаурит—эрликманит														
Эр264-6-1	2.75	5.93	51.48	—	—	—	1.70	—	—	1.48	—	35.00	98.35	$(\text{Ru}_{0.91}\text{Ir}_{0.05}\text{Ni}_{0.05}\text{Os}_{0.02}\text{h}_{1.03}(\text{As}_{0.03}\text{S}_{1.94}))_{1.97}$
Эр264-7-1	—	—	55.24	—	3.46	—	—	0.45	—	3.61	—	37.06	99.81	$(\text{Ru}_{0.91}\text{Pt}_{0.03}\text{Co}_{0.01}\text{h}_{0.95}(\text{As}_{0.08}\text{S}_{1.97}\text{h}_{2.05}))$
Эр264-8-1	—	—	53.49	—	4.51	—	1.29	—	—	3.62	—	36.05	98.96	$(\text{Ru}_{0.90}\text{Pt}_{0.04}\text{Ni}_{0.04}\text{h}_{0.98}(\text{As}_{0.08}\text{S}_{1.94}\text{h}_{2.02}))$
Эр264-8-2	—	—	58.11	—	—	—	1.39	—	—	3.36	—	37.46	100.32	$(\text{Ru}_{0.94}\text{Ni}_{0.04}\text{h}_{0.98}(\text{As}_{0.08}\text{S}_{1.94}\text{h}_{2.02}))$
Сульфиды системы Ru—Fe														
Эр264-2-4-1	—	—	58.68	—	—	—	—	—	10.00	—	—	31.59	100.27	$(\text{Ru}_{2.34}\text{Fe}_{0.72}\text{h}_{3.06}\text{S}_{3.94})$
Сульфиды системы Ru—Ni—Fe														
Эр264-2-5-1	—	—	39.06	—	—	—	19.90	—	9.96	—	—	30.40	99.33	$(\text{Ru}_{0.41}\text{Ni}_{0.36}\text{Fe}_{0.19}\text{h}_{0.96}\text{S}_{1.04})$
Сульфиды системы Ru—Fe														
Эр264-4-1	—	27.68	9.35	12.67	—	—	—	3.81	1.77	25.27	1.24	18.24	100.04	$(\text{Ir}_{0.31}\text{Rh}_{0.27}\text{Ru}_{0.20}\text{Co}_{0.14}\text{Fe}_{0.07}\text{h}_{0.99}(\text{As}_{0.74}\text{Sb}_{0.02}\text{S}_{1.25}\text{h}_{2.01}))$
Калининский массив														
Фазы системы Ir—Os—Ru														
Лаурит														
ЛП-1-1	29.56	65.36	4.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	98.96	$(\text{Ir}_{0.04}\text{Os}_{0.29}\text{Ru}_{0.07})_{1.00}$
7045-3-1	4.17	—	57.85	—	—	—	—	—	—	—	—	37.78	99.79	$(\text{Ru}_{0.96}\text{Os}_{0.04}\text{h}_{1.00}\text{S}_{2.00})$
Сульфиды системы Ir—Os—Ru														
ЛП-6-1	23.68	32.91	5.96	—	—	—	9.03	—	0.72	16.60	—	10.40	99.29	$(\text{Ir}_{0.32}\text{Ni}_{0.28}\text{Os}_{0.23}\text{Ru}_{0.11}\text{Fe}_{0.02}\text{h}_{0.96}(\text{As}_{0.41}\text{Sb}_{0.63}\text{h}_{1.04}))$
ЛП-7-1	—	51.48	3.13	—	—	—	4.35	—	—	21.04	5.39	14.20	99.58	$(\text{Ir}_{0.70}\text{Ni}_{0.19}\text{Ru}_{0.08}\text{h}_{0.97}(\text{As}_{0.73}\text{Sb}_{0.12}\text{S}_{1.18}\text{h}_{2.03}))$

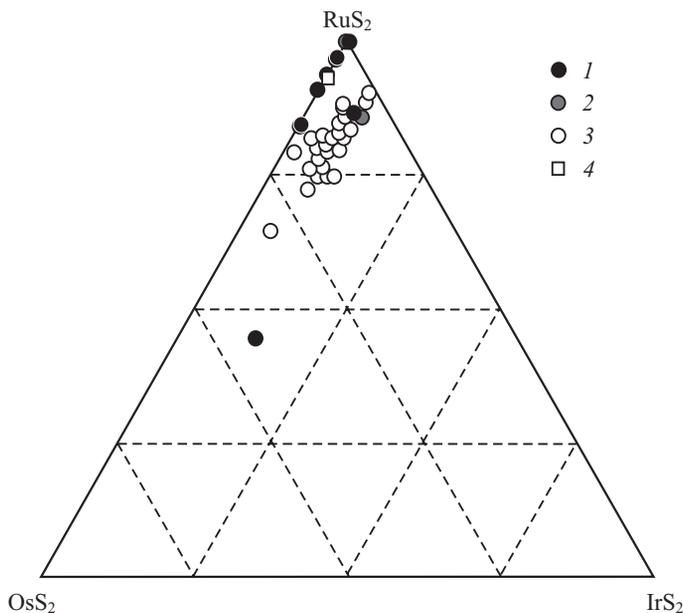


Рис. 3. Тройная диаграмма составов дисульфидов ряда лаурит—эрликманит из хромититов Эргакского и Калнинского массивов.

1—3 — Эргакский массив: 1 — первичные, 2 — вторичные, мышьякосодержащие разновидности, 3 — по материалам предшественников (Кривенко и др., 2005); 4 — первичные, Калнинский массив.

Fig. 3. Triple diagram of composition of disulfides of the laurite—erlichmanite series from chromitites of Ergaksky and Kalninsky massifs.

хорошо изученной в составе подиформных хромитовых месторождений (Осипенко и др., 2002; Гурская и др., 2004; Zaccarini et al., 2008; Киселева и др., 2014). В составе хромититов Эргакского массива эта твердосплавная система до настоящего времени не выявлена. Однако в этом массиве нами было впервые обнаружено единичное зерно твердого раствора Cu—Ru—Os с высокой ролью меди (76.4 мас. %) в триаде (рис. 2, б; табл. 2). Ранее подобный раствор был описан в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля (Дистлер и др., 2003).

Сульфиды ЭПГ широко распространены в хромититах Эргакского массива и редко встречаются в калнинских хромититах. В Эргакском массиве они представлены обычной для подиформных хромитовых руд ассоциацией дисульфидов ряда лаурит—эрликманит и, реже, сульфидами ЭПГ с Ni и Fe (рис. 2, в—д). По составу дисульфиды в основном соответствуют лауриту с содержанием изоморфного осмия 2.0—5.5 мас. % (редко — до 10.0 мас. %), в качестве примесей они содержат Ir и Fe (табл. 2). По сравнению с ранее описанными (Кривенко и др., 2005), изученные дисульфиды отличаются частым отсутствием иридиевого минала (рис. 3).

В отдельную подгруппу в составе минералов ряда лаурит—эрликманит выделены мышьякосодержащие (As до 3.6 мас. %) разновидности с примесью Pt (до 4.5 мас. %), Ni и Co (рис. 2, ж, з; табл. 2). Предположительно, они являются более поздними по отношению к первичному лауриту.

Сульфиды ЭПГ, содержащие Ni и Fe, по составу относятся к двум типам соединений: MeS и Me₃S₄ (табл. 2).

В калнинских хромититах впервые диагностировано зерно лаурита, которое по морфологии и химическому составу хорошо сопоставляется с лауритом из Эргакского массива (рис. 2, *e*, табл. 2).

Сульфоарсениды ЭПГ отмечены в хромититах обоих массивов (рис. 2, *к—м*). Состав этих фаз определяется широкой смесимостью трех миналов — ирарсита, руарсита и осарсита при доминантной роли ирарсита (Ir до 52 мас. %). В химическом составе сульфоарсенидов часто обнаруживается примесь Ni (до 9 мас. %), Co (до 3.8 мас. %), Sb (до 5.4 мас. %) (табл. 2). В составе зерна сульфоарсенида, найденного в тесной ассоциации с миллеритом (NiS) в хромититах Эргакского массива, выявлены значимые содержания родия (12.7 мас. %).

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 Эргакского и Калнинского массивов отмечены твердые растворы двух систем: Os—Ir—Ru и Pt—Pd—Rh. Второй тип по разнообразию минеральных видов (среди которых преобладают соединения Pt и Fe) представлен наиболее широко и обнаруживает сходство с россыпными месторождениями платиноидов, ассоциирующих с зональными массивами Урала и Корякии (Пушкарев и др., 2007; Сидоров и др., 2012; Малич и др., 2013).

Проведенные исследования позволили выявить в хромшпинелидах только сингенетические микровключения тугоплавких платиноидов Os—Ir—Ru специализации. Это доказывает существование общих условий концентрирования этих элементов и хрома. В настоящее время такая пространственная и генетическая связь является общепризнанной (Талхаммер, 1996; Zhou et al., 1996; Melcher et al., 1997).

Твердые растворы второго типа в хромшпинелидах не обнаружены. Они приурочены к серпентин-хлоритовым интерстициям, цементирующим хромшпинелидовый «каркас», и, предположительно, образовались позднее хромита, что согласуется с более ранними исследованиями (Пушкарев и др., 2007).

Образование минералов платиноидов и хромшпинелидов, по-видимому, было связано с мобилизацией ЭПГ из гетерогенной рудно-силикатной жидкости, отделившейся от большого объема «материнского» лерцолитового субстрата (содержащего ЭПГ в рассеянном состоянии) в результате его частичного плавления. Дальнейшая судьба тугоплавких ЭПГ определялась их концентрированием совместно с другими компонентами (Ni, Cu и др.), не участвующими в процессе образования хромитов, в расплаве с последующим отложением из высоконасыщенных надкритических флюидов.

Существенной является многоэтапность процесса формирования минералов ЭПГ. В случае системы Os—Ir—Ru, наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru и находящиеся с ними в равновесии, фракционирующие рутений, дисульфиды ряда лаурит—эрликманит. Металлические твердые растворы Cu—Ru—Os, сульфиды состава Ru—Fe, Ru—Ni—Fe и сульфоарсениды ЭПГ мы связываем с более поздними процессами изменения первичных минералов платиновых металлов. Эти процессы могли

быть вызваны мантийным метасоматозом: при воздействии глубинных восстановленных флюидов на хромититы происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ (Garuti, Zaccarini, 1997; Melcher et al., 1997; Ahmed, Arai, 2003; Киселева и др., 2014).

Образование минералов системы Pt—Pd—Rh происходило в два этапа: ранний (более высокотемпературный) и поздний (низкотемпературный). К главным минералам раннего парагенезиса относятся изоферроплатина, тетраферроплатина, железистая платина. Все остальные установленные минералы, вероятно, относятся к низкотемпературному парагенезису, возникшему в результате взаимодействия ранних минералов ЭПГ с восстановленным флюидом, обогащенным S и As, а также Ni, Cu, Pd, Rh (Garuti et al., 2002; Пушкарев и др., 2007).

ВЫВОДЫ

Впервые среди минералов системы Os—Ir—Ru в хромититах Эргакского массива установлены металлический твердый раствор Cu—Ru—Os, сульфиды ЭПГ с никелем и железом (последние присутствуют в их составе как главные компоненты фаз), а также сульфоарсенид с высоким содержанием Rh (12.7 мас. %). В хромититах Калнинского массива выявлены лаурит и сульфоарсениды.

Отсутствие в хромититах Эргакского массива металлических твердых растворов системы Os—Ir—Ru при постоянном присутствии дисульфидов ряда лаурит—эрликманит указывает на высокое парциальное давление серы при формировании хромитовых руд и сингенетичных с ними минералов ЭПГ. Об этом же свидетельствует широкое развитие эргакских хромититов акцессорных сульфидов цветных металлов.

По химическому составу минералы ряда лаурит—эрликманит в хромититах обоих массивов в основном соответствуют лауриту с содержанием изоморфного осмия 2.0—5.5 мас. % (до 10.0 мас. %) при очень низком содержании иридия. С учетом экспериментов (Andrews, Brenan, 2002) это указывает на высокую температуру образования Ru—Os сульфидов (1200—1250 °С).

Отдельную подгруппу минералов ряда лаурит—эрликманит составляют мышьяксодержащие (As до 3.6 мас. %) разновидности с примесью платины (до 4.5 мас. %), Ni и Co. Основная особенность их химического состава заключается в том, что в лигандной группировке часть серы замещена мышьяком и, таким образом, эта подгруппа является переходной к достаточно распространенным сульфоарсенидным фазам.

Главным фактором образования платиноидной минерализации является флюидная мобилизация, способствовавшая концентрированию и отложению минералов ЭПГ. Процесс формирования ассоциации минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru системы и находящиеся с ними в равновесии, фракционирующие рутений дисульфиды ряда лаурит—эрликманит. Металлические твердые растворы Cu—Ru—Os, сульфиды систем Ru—Fe, Ru—Ni—Fe и сульфоарсениды ЭПГ образовались в результате изменения первичных минералов платиноидов при воздействии восстановленных флюидов мантийного происхождения, способствовавших ремобилизации и переотложению ЭПГ.

Список литературы

- Волкова Н. И., Ступаков С. И., Бабин Г. А., Руднев С. Н., Монгуш А. А. Подвижность редких элементов при субдукционном метаморфизме (на примере глаукофановых сланцев Куртушибинского хребта, Западный Саян) // Геохимия. **2009**. № 4. С. 401—414.
- Гурская Л. И., Смелова Л. В., Колбанцев Л. Р., Ляхницкая В. Д., Ляхницкий Ю. С., Шахова С. Н. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала. СПб.: 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. месторожд. **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.: Геоинформцентр, **2003**. 409 с.
- Еханин Д. А. Геологическое строение и перспективы рудоносности Калнинского ультрабазитового массива // Разведка и охрана недр. **2010**. № 9. С. 24—28.
- Забияка А. И. Верхнеамыльский хромитоносный район / Геология и полезные ископаемые Красноярского края. Вып. 9. Красноярск: КНИИГиМС, **2008**. С. 193—205.
- Киселева О. Н., Жмодик С. М., Дамдинов Б. Б., Агафонов Л. В., Белянин Д. К. Состав и эволюция платинометалльной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян) // Геология и геофизика. **2014**. Т. 55. № 2. С. 333—349.
- Кривенко А. П., Подлипский М. Ю., Кубышев А. И., Катанов С. Г. Перспективы хромитоносности и платиносности гипербазитов Верхнеамыльского района в Западном Саяне / Минеральные ресурсы Красноярского края. Красноярск: РИЦ КНИИГиМС, **2002**. С. 314—324.
- Кривенко А. П., Подлипский М. Ю., Агафонов Л. В. Рудная минерализация гипербазитов Эргакского массива и перспективы его хромитоносности / Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества. Вып. 8. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, **2005**. С. 32—44.
- Лоскутов И. Ю., Чернышов А. И., Кичеева А. В. Связь химизма и рудоносности гипербазитов Калнинского массива (Западный Саян) // Вестник Томского гос. ун-та. **2015**. № 400. С. 366—370.
- Малич К. Н., Баданина И. Ю., Кнауф В. В., Мейзел Т. Минералого-геохимические ассоциации платиноидов дунит-гарцбургитовых и клинопироксенит-дунитовых массивов // Труды ИГТ УрО РАН. **2013**. Вып. 160. С. 255—260.
- Осипенко А. Б., Сидоров Е. Г., Костянов А. И., Толстых Н. Д. Хромититы гипербазитовых массивов п-ова Валижген, Коржия // Геол. рудн. месторожд. **2002**. Т. 44. № 1. С. 77—92.
- Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна) / Под ред. В. С. Соболева и Н. Л. Добрецова. Новосибирск: Наука, **1977**. 222 с.
- Подлипский М. Ю., Кривенко А. П. Платино-хромитовое оруденение в офиолитовых гипербазитах Западного Саяна / Платина России. Новые нетрадиционные типы месторождений и рудопроявлений платиносодержащего сырья. Т. 6. М., **2005**. С. 100—109.
- Пушкарев Е. В., Аникина Е. В., Гарути Дж., Заккарини Ф. Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. **2007**. № 3. С. 28—65.
- Сидоров Е. Г., Козлов А. П., Толстых Н. Д. Гальмознанский базит-гипербазитовый массив и его платиносность. Москва: Научный мир, **2012**. 288 с.
- Талхаммер Т. В. Ассоциации минералов платиновой группы в массивных хромитовых рудах Кемпирсайского офиолитового комплекса (Южный Урал) как проявление мантийного метасоматоза // ЗРМО. **1996**. № 1. С. 25—36.
- Чернышов А. И., Юричев А. Н. Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива в Западном Саяне // Геотектоника. **2013**. № 4. С. 31—46.
- Чернышов А. И., Кичеева А. В., Подлипский М. Ю. Петроструктурные неоднородности ультрамафитов Эргакского хромитоносного массива (Западный Саян) // ЗРМО. **2016**. № 5. С. 25—38.
- Чернышов А. И., Лоскутов И. Ю., Кичеева А. В., Подлипский М. Ю. Потенциальная хромитоносность ультрамафитов Эргакского массива (северо-восток Западного Саяна) // Руды и металлы. **2018**. № 1. С. 47—53.
- Юричев А. Н. Калнинский ультрамафитовый массив Западного Саяна: рудная минерализация и ее генетическая природа // Известия Томского политехнич. у-та. **2015**. Т. 326. № 2. С. 61—69.

References

- Ahmed A. H., Arai S. Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 597—616.
- Andrews D. R. A., Brenan J. M. Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite and Os—Ir alloy. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 1705—1716.
- Chernyshov A. I., Yurichev A. N. Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalninsky chromite-bearing massif, Western Sayan. *Geotectonics*. **2013**. Vol. 47. No. 4. C. 266—278 (in Russian).
- Chernyshov A. I., Kicheeva A. V., Podlipsky M. Yu. Petrostructural heterogeneities of ultramafites of the Ergaksky chromite-bearing massif (West Sayan). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc)*. **2016**. Vol. 145. No. 5. P. 25—38 (in Russian).
- Chernyshov A. I., Loskutov I. Yu., Kicheeva A. V., Podlipsky M. Yu. Chromite potential of ultramafites from Ergaksky massif, northeast of the Western Sayan. *Ores and metals*. **2018**. No. 1. C. 47—53 (in Russian).
- Distler V. V., Kryachko V. V., Yudovskaya M. A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geol. Ore Deposits*. **2003**. Vol. 45. No. 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.
- Garuti G., Pushkarev E. V., Zaccarini F. Compositions and paragenesis of Pt alloys from chromitites of the Ural-Alaskan type Kytlym and Uktus complexes, Northern and Central Urals, Russia. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 357—376.
- 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-Kitoy and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. No. 2. P. 259—272.
- Krivenko A. P., Podlipsky M. Yu., Kubyshv A. I., Katanov S. G. Prospects of chromite-bearing and platinum-bearing of hyperbasites of Upper-Amyl region in the Western Sayan. In: *Mineral resources of Krasnoyarsk Region*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Res. Inst. Geol. Miner. Res., 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*. Geocology of natural environment and society. Issue 8. Kyzyl: Tuviniian Inst. Explor. Natural Res. Siberian Branch 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.
- Loskutov I. Yu., Chernyshov A. I., Kicheeva A. V. Communication of chemistry and ore-bearing of hyperbasites of Kalninsky massif (Western Sayan). *Tomsk State University Bull.* **2015**. No. 400. P. 366—370 (in Russian).
- 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. Ural Branch RAS*. **2013**. Vol. 160. P. 255—260 (in Russian).
- Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T. V., Stumpfl E. F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *J. Petrol.* **1997**. Vol. 38. P. 1419—1458.
- Osipenko A. B., Sidorov E. G., Kostojanov A. I., Tolstykh N. D. Chromitites of ultramafic complexes of the Valizhgen Peninsula, Koryak Highland. *Geol. Ore Deposits*. **2002**. Vol. 44. No. 1. P. 69—83.
- Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by example of the Polar Urals and the Western Sayan). V.S. Sobolev and N.L. Dobretsov (eds). Novosibirsk: Nauka, **1977**. 222 p. (in Russian).
- Podlipsky M. Yu., Krivenko A. P. Platinum-chromite mineralization in ophiolite hyperbasites of the Western Sayan. In: *Platinum of Russia. New unconventional types of deposits and ore occurrences of platinum-containing raw materials*. **2005**. Vol. 6. P. 100—109 (in Russian)
- Pushkarev E. V., Anikina E. V., Garuti J., Zaccarini F. Chromium-platinum deposits of nizhny-tagil type in the Urals: structural-substantial characteristic and a problem of genesis. *Lithosfera*. **2007**. No. 3. P. 28—65 (in Russian).

Sidorov E. G., Kozlov A. P., Tolstykh N. D. Galmoehnian basite-hyperbasite massif and its platinum content. Moscow: Scientific world, **2012**. 288 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**. No. 1. P. 25—36 (*in Russian*).

Volkova N. I., Stupakov S. I., Rudnev S. N., Babin G. A., Mongush A. A. Mobility of trace elements during subduction metamorphism as exemplified by the blueschists of the Kurtushibinsky range, Western Sayan. *Geochem. Int.* **2009**. Vol. 47. No. 4. P. 380—392.

Yekhanin D. A. Geological structure and ore potential of Kalninsky ultrabasic massif. *Prospect Protect. Miner. Res.* **2010**. No. 9. P. 24—28 (*in Russian*).

Yurichev A. N. Kalninsky ultramafic massif of the Western Sayan: ore mineralization and its genetic nature. *Bull. Tomsk Polytech. University*. **2015**. Vol. 326. No. 2. P. 61—69 (*in Russian*).

Zabiyaka A. I. Upper-Amyl chromite-bearing region. In: *Geology and minerals of Krasnoyarsk region*. Issue 9. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Res. Instit. Geol. Miner. Res., **2008**. P. 193—205 (*in Russian*).

Zaccarini F., Pushkarev E., 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.

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.

Поступила в редакцию
1 апреля 2019 г.