

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

DOI: 10.30695/zrmo/2019.1482.05

ЗРМО, № 2, 2019
Zapiski RMO, N 2, 2019

А. Н. ЮРИЧЕВ, А. И. ЧЕРНЫШОВ, Е. В. КОРБОВЯК

**МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ ИЗ ХРОМИТИТОВ
КЕМПИРСАЙСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА
(МУГОДЖАРЫ, КАЗАХСТАН): НОВЫЕ ДАННЫЕ***Томский государственный университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 36;
e-mail: juratur@sibmail.com*

Кемпирсайский массив является крупнейшим массивом ультрамафитов на юге Урала и хорошо известен благодаря своим уникальным по размеру месторождениям хромитов. На месторождении «Алмаз-Жемчужина» внутри зерен хромшпинелидов из массивных хромититов обнаружены и охарактеризованы изолированные мелкие зерна минералов ЭПГ, представленные металлическими твердыми растворами Os—Ir—Ru и Rh—Zn—Pt (эта система диагностирована в массиве впервые), дисульфидами изоморфного ряда лаурит-эрликманит и сульфидами Ir—Ni—Cu системы. Среди металлических твердых растворов Os—Ir—Ru выявлены зерна с повышенными концентрациями рутения (до 45 мас. %), что расширяет ранее известные границы диапазона смесимости элементов триады. Основная тенденция фракционирования Os, Ru и Ir в сульфидах заключается в обогащении дисульфидов осмием и рутением, а иридий преимущественно концентрируется совместно с Ni и Cu в сульфидах с различным соотношением металл—сера. Процесс формирования ассоциаций выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru и дисульфиды ряда лаурит—эрликманит, а минералы Rh—Zn—Pt и Ir—Ni—Cu систем образовались позднее в связи с повторными процессами частичного плавления и инъецирования новообразованного расплава в уже сформированные реститы или процессами мантийного метасоматоза.

Ключевые слова: Кемпирсайский массив, хромититы, минералы ЭПГ, химический состав, генезис.

*A. N. YURICHEV, A. I. CHERNYSHOV, E. V. KORBOVYAK. PLATINUM GROUP
MINERALS FROM CHROMITITES OF KEMPIRSAI ULTRAMAFIC MASSIF
(THE SOUTH URALS): NEW DATA*

Tomsk State University, Tomsk, Russia

Kempirsai is the largest massif of ultramafites in the South Urals, it is well known for its unique chromite ore deposits. Grains of chromspinelides in massive chromitites of the «Diamond-Pearl» deposit contain small isolated inclusions of PGE minerals represented by solid solutions of Os—Ir—Ru and Rh—Zn—Pt (later system has been revealed in the massif for the first time), disulfides of the isomorphous laurite-erlichmanite series, and sulfides of the Ir—Ni—Cu system. Some grains of the metal Os—Ir—Ru solid solutions contain up to 45 wt % of ruthenium, extending previously known boundaries of the mixing range in this triad of elements. The main trend in the Os, Ru and Ir fractionation in sulfides is enrichment of disulfides in osmium and ruthenium; iridium is mostly

concentrated together with Ni and Cu in sulfides with different metal-sulfur ratios. The process of mineral-forming of these PGE associations was developing in several stages. The earliest among them are metallic solid solutions of Os—Ir—Ru and disulfides of laurite-erlichmanite series; minerals of Rh—Zn—Pt and Ir—Ni—Cu systems are related to later events connected with repeated partial melting and injection of the newly formed melt into already formed restites, or processes of the mantle metasomatism.

Keywords: Kempirsai massif, chromitites, PGE minerals, chemical composition, genesis.

Кемпирсайский массив является крупнейшим массивом ультрамафитов на юге Урала и хорошо известен благодаря своим уникальным по размеру месторождениям хромитов. Он сложен метаморфическими (тектонизированными) ультрамафитами офиолитовой ассоциации, располагающимися в крупном Сакмарском аллохтоне (реликт океанической коры раннепалеозойского возраста), шарьированном в позднем палеозое на восточную окраину Восточно-Европейского палеоконтинента при закрытии Уральского палеоокеана (История..., 1984; Melher et al, 1994; Fershtater, 2013).

Ранее, в гигантских хромитовых месторождениях Кемпирсайского массива были установлены две практически важные особенности руд (Дистлер и др., 1990). Первая — значительная обогащенность их тугоплавкими элементами платиновой группы (ЭПГ) — иридием, осмием и рутением. Вторая — большое разнообразие минеральных фаз тугоплавких ЭПГ.

При изучении вещественного состава хромшинелидов из густовкрапленых и сливных хромитов карьера «Объединенный» на месторождении «Алмаз-Жемчужина» авторами были выявлены и диагностированы микроскопические включения минералов платиновой группы. В работе приводится химическая типизация установленных минералов и предполагаются условия и механизмы их образования в хромитовых рудах.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Кемпирсайский ультрамафитовый массив имеет в плане узкую вытянутую форму, резко расширяющуюся в южной части (от 0.6 км на севере до 31.6 км на юге); он протягивается на ~90 км в меридиональном направлении, а его площадь составляет более 900 км² (рис. 1). Контакты массива с вмещающими породами девона, ордовика и докембрия тектонические.

В северной и центральной частях Кемпирсайский массив сложен преимущественно гарцбургитами и энстатитовыми дунитами, реже плагиодунитами, пироксенитами, верлитами и плагиоверлитами (Павлов, Григорьева, 1974). По периферии массива картируются габброиды (габбро, габбро-нориты и оливиновые габбро). В южной и юго-восточной частях массива выделяются две субмеридиональные зоны (западная и восточная), сложенные крупными телами массивных дунитов, залегающих среди пород шлирово-полосчатого комплекса, энстатитовых дунитов и гарцбургитов при подчиненной роли верлитов и лерцолитов. В пределах этих двух зон расположены хромитовые месторождения, образующие Главное (Южно-Кемпирсайское) рудное поле. Отдельные рудные тела хромититов известны в северной и центральной частях Кемпирсайского массива, однако они характеризуются малыми размерами и более низким качеством рудного сырья. Всего к настоящему времени в пределах массива выявлено около 160 месторождений и рудопроявлений хромитов.

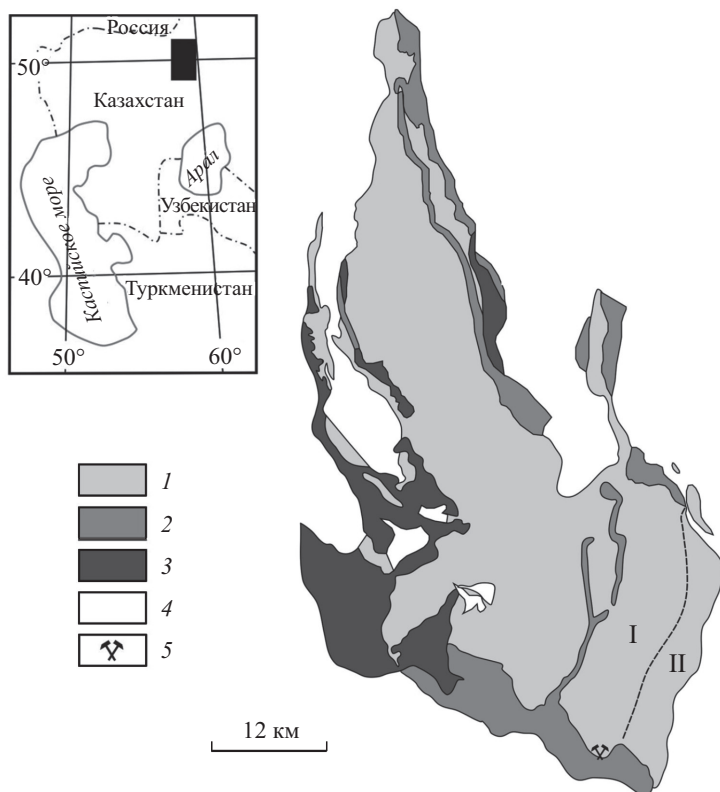


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кемпирсайского ультрамафитового массива (Павлов, Григорьева, 1987; Чашухин, Вотяков, 2009; с корректировками авторов).

1 — дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия пород; 2 — клинопироксенит-габбровые комплексы; 3 — оливиновые и роговообманковые габбро, троктолиты и параллельные диабазовые дайки; 4 — вмещающие вулканогенно-осадочные породы (PR—D); 5 — местоположение исследуемого хромитового месторождения «Алмаз-Жемчужина» в структуре Кемпирсайского массива. Субмеридиональные зоны Главного (Южно-Кемпирсайского) рудного поля: I — Западная, II — Восточная. На врезке показано географическое расположение Кемпирсайского массива.

Fig. 1. Geographic location and geological sketch map of Kempirsai ultramafic massif (Pavlov, Grigorieva, 1987; Chashchukhin, Votyakov, 2009; with authors' corrections).

Западная зона Главного рудного поля включает крупные месторождения «Алмаз-Жемчужина», «Миллионное», «Первомайское», «20 лет КазССР» и более 15 средних и мелких месторождений; восточная зона — месторождения «Спорное», «Гигант», «Восход», «40 лет КазССР», «Молодежное» и более 30 средних и мелких месторождений, а также рудопроявлений. Обе зоны смыкаются на юге в районе месторождения «Алмаз-Жемчужина» и на севере в районе месторождения «Александровское».

Хромитовые месторождения обычно состоят из серии сближенных линзовидных и реже жиллообразных рудных тел, размеры которых варьируют по протяженности от первых десятков метров до 1.5 км, при мощностях от первых метров до 150 м. Они сложены преимущественно массивными крупнозернистыми хромититами (90—95 % хромшинелидов). В периферийных частях рудных тел наряду с массивными ограниченным распространением пользуются нодулярные и густовкрапленные руды (Талхаммер, 1996). Интерстиции между зернами хромшпинелидов выполнены преимущественно интенсивно серпентинизированным оливином, реже киммереритом, карбонатами, уваровитом.

Если первые находки хромитов на Кемпирсайском массиве были сделаны еще в 1923 г. (Сегедин, 2001), то акцессорные минералы ЭПГ в массивных хромититах массива впервые обнаружены только в 1987 г. (Волченко, Вигоров, 1987; Дистлер и др., 1987).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с задачами настоящего исследования был использован традиционный подход минераграфического изучения рудных минералов с применением метода растровой электронной микроскопии и определением химического состава фаз рентгеновским микроанализом (Reed, 2005). Использовалась аппаратура: электронные микроскопы TESCAN Vega 3 SBH, Tescan Vega II LMU с энергодисперсионной (с детектором Si(Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионной INCA Wave 700 приставками, рентгеновский микроанализатор «Camebax-micro». Перед исследованием из отобранных образцов хромититов были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3—4 мм, с последующим напылением на их изучаемые поверхности слоя углерода толщиной 25—30 нм. 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 и Ru были применены чистые металлы, для Ni — миллерит, для Zn — сфалерит, для Cu и S — халькопирит. Для анализов на минералы платиновой группы использованы аналитические линии: $L\alpha$ для Pt, Ir, Rh, Ru; $K\alpha$ для S, Ni, Cu, Zn; $M\alpha$ для Os.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Распределение минералов ЭПГ в хромитовых рудах. В Кемпирсайском массиве минералы ЭПГ были установлены только в густовкрапленных и сливных хромититах, тогда как в умеренно- и бедновкрапленных разновидностях хромититов и акцессорных хромшпинелидах из дунитов и гарцбургитов не были обнаружены. Минералы ЭПГ наблюдаются в виде самостоятельных изолированных зерен таблитчатого облика размером до 10 мкм во внутренних частях зерен хромшпинелидов из хромититов. Нередко они дают в аншлифах пятиугольные или шестиугольные (реже — квадратные) сечения (рис. 2, 3). Исключение составляют только минералы системы Rh—Zn—Pt, которые формируют выделения неправильной или вытянутой формы (рис. 2, $z-e$).

Минеральные формы ЭПГ и особенности их химического состава. Исследование минерального состава выявленных платиновых металлов кемпирсайских хромитовых руд позволили разделить их на две основные группы: металлические твердые растворы ЭПГ и сульфиды ЭПГ. При этом вторая группа минералов характеризуется более широким распространением в изученных образцах.

Металлические твердые растворы ЭПГ относятся к двум системам: Os—Ir—Ru и Rh—Zn—Pt. Первая система является наиболее обычной и хорошо

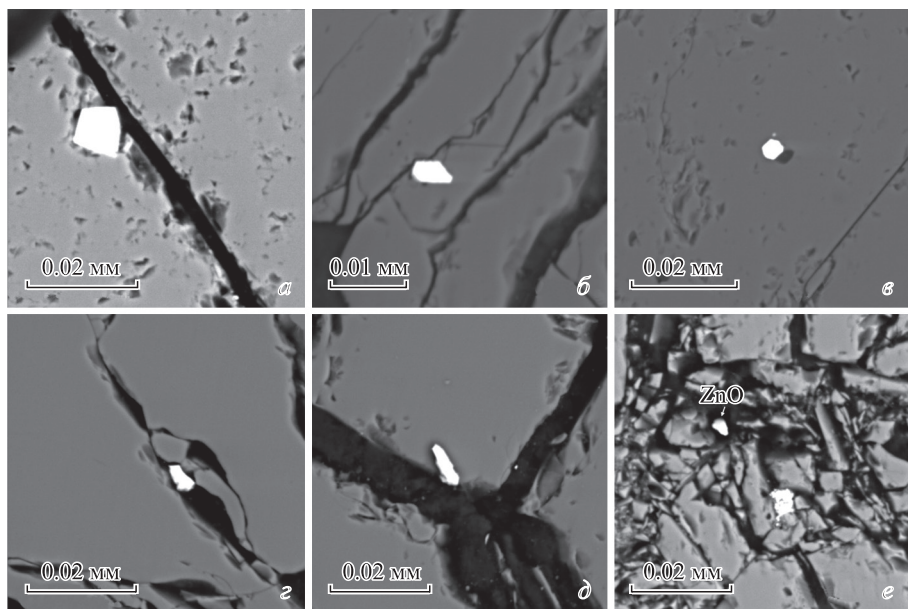


Рис. 2. Микрофотографии зерен минералов ЭПГ в хромитовой матрице массивных хромититов Кемпирсайского массива (режим BSE).

a—e — минералы системы Os—Ir—Ru; *z—e* — минералы системы Rh—Zn—Pt.

Fig. 2. Microphotographs of PGE minerals grains in the matrix of massive chromitites of the Kempirsai massif (BSE mode): *a—e* — Os—Ir—Ru system minerals; *z—e* — Rh—Zn—Pt system minerals.

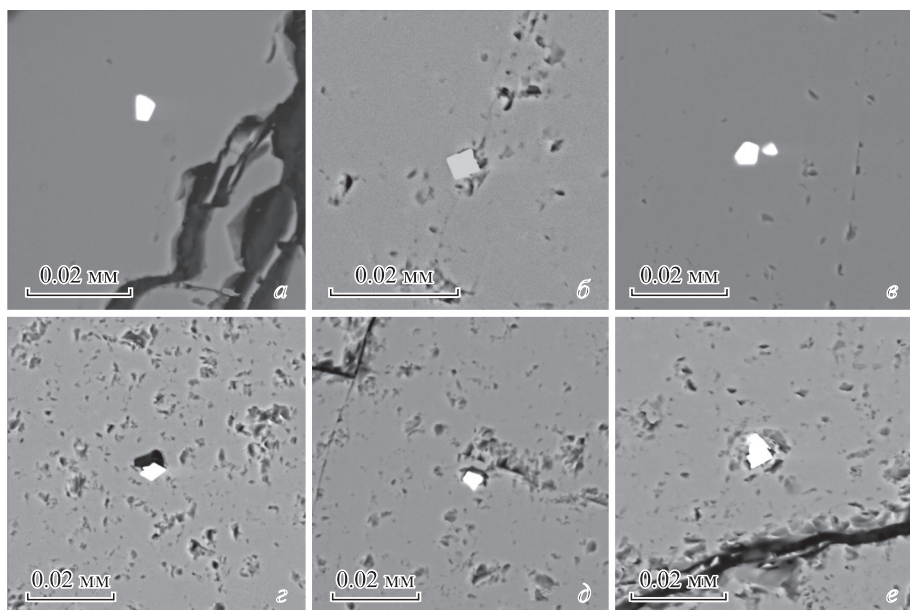


Рис. 3. Микрофотографии зерен сульфидов ЭПГ в хромитовой матрице массивных хромититов Кемпирсайского массива (режим BSE).

a, б — лаурит; *в—д* — минералы изоморфного ряда лаурит—эрликманит; *е* — минералы системы Ir—Ni—Cu.

Fig. 3. Microphotographs of PGE sulfide grains in matrix of massive chromitites of the Kempirsai massif (BSE mode): *a, б* — laurite; *в—д* — minerals of isomorphous laurite—erlichmanite series; *е* — Ir—Ni—Cu system minerals.

**Химический состав сульфидов ЭПГ и металлических твердых растворов ЭПГ
из массивных хромититов Кемпирсайского массива, мас. %**

**Chemical composition of PGE sulfides and metallic PGE solid solutions
in massive chromitites of the Kempirsai massif, wt %**

№	Образец	Ru	Os	Ir	Ni	Cu	S	Сумма	Формула
Лаурит									
1	939/545-1.1	54.57	2.70	4.23	—	—	38.15	99.65	$(\text{Ru}_{0.91}\text{Ir}_{0.04}\text{Os}_{0.02})_{0.97}\text{S}_{2.03}$
2	2/1-4.1	47.79	13.04	—	—	—	38.17	99.61	$(\text{Ru}_{0.84}\text{Os}_{0.12})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
3	2/1-9.1	46.36	6.44	10.39	0.50	—	36.39	100.08	$(\text{Ru}_{0.81}\text{Ir}_{0.10}\text{Os}_{0.06}\text{Ni}_{0.02})_{0.99}\text{S}_{2.01}$
4	3/3-4.1	49.34	3.41	6.81	0.89	—	39.17	99.61	$(\text{Ru}_{0.84}\text{Ir}_{0.06}\text{Os}_{0.03}\text{Ni}_{0.03})_{0.96}\text{S}_{2.04}$
Изоморфный ряд лаурит—эрликманит									
5	2/1-2.1	40.70	13.64	9.56	—	—	33.67	97.57	$(\text{Ru}_{0.77}\text{Os}_{0.14}\text{Ir}_{0.09})_{1.00}\text{S}_{2.00}$
6	3/2-9.1	34.32	21.11	11.51	—	—	32.60	99.54	$(\text{Ru}_{0.67}\text{Os}_{0.22}\text{Ir}_{0.12})_{1.01}\text{S}_{1.99}$
7	3/2-9.2	33.01	21.88	11.41	—	—	32.53	98.82	$(\text{Ru}_{0.64}\text{Os}_{0.23}\text{Ir}_{0.12})_{0.99}\text{S}_{2.01}$
8	3/1-3.1	7.11	47.89	17.45	0.55	0.46	26.04	99.49	$(\text{Os}_{0.62}\text{Ir}_{0.22}\text{Ru}_{0.17}\text{Ni}_{0.02}\text{Cu}_{0.02})_{1.05}\text{S}_{1.95}$
9	3/1-7.1	6.45	53.37	13.36	—	—	26.31	99.48	$(\text{Os}_{0.68}\text{Ir}_{0.17}\text{Ru}_{0.15})_{1.00}\text{S}_{2.00}$
10	3/1-9.1	12.69	45.85	12.77	—	—	26.87	98.18	$(\text{Os}_{0.57}\text{Ru}_{0.30}\text{Ir}_{0.16})_{1.03}\text{S}_{1.97}$
11	3/1-14.2	5.00	50.89	16.71	0.49	0.35	25.41	98.85	$(\text{Os}_{0.68}\text{Ir}_{0.22}\text{Ru}_{0.12}\text{Ni}_{0.02}\text{Cu}_{0.01})_{1.05}\text{S}_{1.95}$
12	3/1-26.1	16.06	41.22	14.39	—	—	27.98	99.65	$(\text{Os}_{0.50}\text{Ru}_{0.36}\text{Ir}_{0.17})_{1.03}\text{S}_{1.97}$
13	3/1-18.1	15.89	35.52	19.18	—	—	28.73	99.32	$(\text{Os}_{0.42}\text{Ru}_{0.35}\text{Ir}_{0.22})_{0.99}\text{S}_{2.01}$
Сульфиды системы Ir—Ni—Cu									
14	3/1-19.1	—	—	50.03	18.35	7.41	23.14	98.93	$(\text{Ir}_{0.36}\text{Ni}_{0.43}\text{Cu}_{0.16})_{0.95}\text{S}_{1.05}$
15	3/1-10.1	—	—	64.50	1.21	9.97	24.40	100.08	$(\text{Ir}_{1.32}\text{Cu}_{0.62}\text{Ni}_{0.08})_{2.02}\text{S}_{2.98}$
16	3/1-14.1	0.36	4.06	50.85	9.26	7.81	27.48	99.83	$(\text{Ir}_{0.93}\text{Ni}_{0.55}\text{Cu}_{0.43}\text{Os}_{0.08}\text{Ru}_{0.01})_{2.00}\text{S}_{3.00}$
17	3/1-25.1	—	10.47	53.30	0.81	6.78	27.00	98.35	$(\text{Ir}_{0.66}\text{Cu}_{0.25}\text{Os}_{0.13}\text{Ni}_{0.03})_{1.07}\text{S}_{1.93}$
Металлические твердые растворы системы Os—Ir—Ru									
18	3/1-20.1	11.94	62.24	20.40	5.35	—	—	99.93	$(\text{Os}_{0.51}\text{Ru}_{0.18}\text{Ir}_{0.17}\text{Ni}_{0.14})_{1.00}$
19	3/1-16.1	20.73	45.36	25.57	8.50	—	—	100.16	$(\text{Os}_{0.33}\text{Ru}_{0.28}\text{Ir}_{0.19}\text{Ni}_{0.20})_{1.00}$
20	3/1-17.1	15.43	42.10	38.02	—	—	—	95.55	$(\text{Os}_{0.39}\text{Ir}_{0.34}\text{Ru}_{0.27})_{1.00}$
21	3/2-8.1	45.83	31.20	18.13	4.15	—	—	99.30	$(\text{Ru}_{0.58}\text{Os}_{0.21}\text{Ir}_{0.12}\text{Ni}_{0.09})_{1.00}$

Примечание. Анализы № 2, 5—7, 9, 17, 20 — выполнены методом волнодисперсионной рентгеновской спектроскопии (WDS), остальные — методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS).

изученной в составе полиформных хромитовых месторождений и проявлений (Осипенко и др., 2002; Гурская и др., 2004; Zaccarini et al, 2008; Киселева и др., 2014). В различных массивах состав этой системы различается только по относительной доли каждого из трех ЭПГ. Как показывают полученные химические анализы, минералы Os—Ir—Ru системы из Кемпирсайского массива характеризуются большим диапазоном смесимости при преимущественном концентрировании осмия (до 62 мас. %) (табл. 1, рис. 4, а). Выявлено зерно, в котором преобладает рутений (~45 мас. %). Отметим, что ранее считалось, что концентрация данного элемента в обнаруженных фазах не превышает 10 мас. % (Дистлер и др., 2003). Помимо означенной триады ЭПГ, в составе металлических твердых растворов постоянно присутствует никель (до 8.5 мас. %).

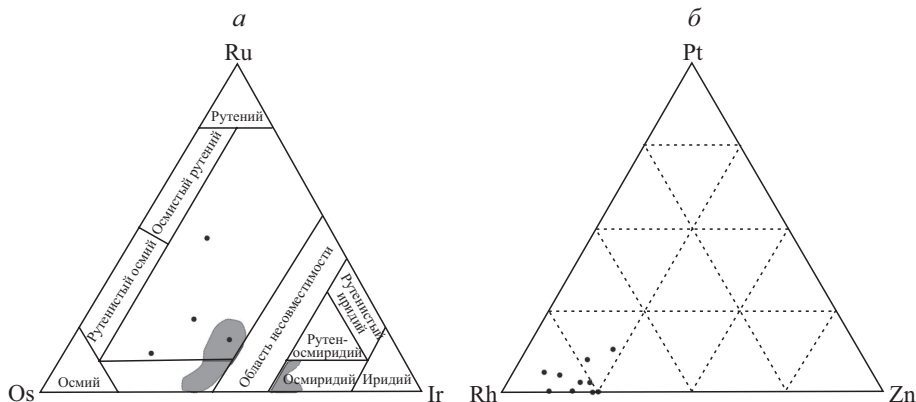


Рис. 4. Тройные диаграммы состава металлических твердых растворов системы Os—Ir—Ru (а) и системы Rh—Zn—Pt (б). Серые поля на диаграмме (а) — область химических составов металлических твердых растворов ЭПГ из хромититов Кемпирсайского массива (по: Дистлер и др., 2003).

Fig. 4. Triple diagrams of composition of metallic solid solutions of the Os—Ir—Ru (a) and the Rh—Zn—Pt (b) systems. Gray fields on the a diagram — area of chemical compositions of metallic solid solutions of PGE from chromitites of the Kempirsai massif, according (after Distler et al., 2003).

Вторая система (Rh—Zn—Pt) по типоморфным особенностям выделений отличается от первой и представлена двумя разновидностями: Rh—Zn (с содержанием цинка до 24 мас. %) и Rh—Zn—Pt (с содержанием цинка до 22 мас. % и платины до 13 мас. %). При этом концентрация родия в составе таких металлических твердых растворов достигает 88 мас. % (табл. 2, рис. 4, б). Иногда обнаруживаются самостоятельные микроскопические зерна цинкита (рис. 2, е). Уникальность системы заключается в том, что за исключением ирарсита — единственного минерала, обогащенного родием (Дистлер и др., 1987) — другие минералы, содержащие родий, в пределах кемпирсайских хромититов ранее не были установлены.

Сульфиды ЭПГ преимущественно представлены обычной для данного комплекса пород и хромитовых руд ассоциацией дисульфидов ряда лаурит—эрликманит и, реже, сульфидами ЭПГ с цветными металлами (никелем и медью).

Минералы ряда лаурит—эрликманит образуют практически непрерывный изоморфный ряд. При этом, если лаурит представлен почти чистой рутениевой разновидностью, то чисто осмиевый конечный член изоморфного ряда в процессе исследования не установлен. Характерным изоморфным компонентом является иридий, концентрация которого достигает 19 мас. % (табл. 1). В качестве примесных элементов в составе сульфидов ЭПГ отмечаются никель (до 0.55 мас. %) и медь (до 0.46 мас. %).

Во второй группе — сульфидах ЭПГ с цветными металлами — никель и медь присутствуют как главные компоненты фаз. Как отмечалось и ранее (Талхаммер, 1996; Дистлер и др., 2003), основная особенность состава минералов заключается в том, что соединения построены преимущественно на основе иридия (до 64.5 мас. %) при резко подчиненной роли осмия и рутения (последний в большинстве случаев вообще отсутствует). Основными компонентами рассматриваемых сульфидов являются никель и медь, содержания которых изменяются в широком диапазоне и достигают 18.3 и 10.0 мас. % соот-

**Химический состав металлических твердых растворов системы Rh—Zn—Pt
из массивных хромититов Кемпирсайского массива, мас. %**

**Chemical composition of metallic solid solutions of the Rh—Zn—Pt system
in massive chromitites of the Kempirsai massif, wt %**

№	Образец	Rh	Zn	Pt	Сумма	Формула
Минералы системы Rh—Zn						
1	2/1-5.1	86.92	11.82	—	98.74	$(\text{Rh}_{0.82}\text{Zn}_{0.18})_{1.00}$
2	3/2-13.1	82.14	17.97	—	100.11	$(\text{Rh}_{0.74}\text{Zn}_{0.26})_{1.00}$
3	939/545-6.1	75.01	24.57	—	99.58	$(\text{Rh}_{0.66}\text{Zn}_{0.34})_{1.00}$
4	3/1-24.1	74.22	22.17	—	96.39	$(\text{Rh}_{0.68}\text{Zn}_{0.32})_{1.00}$
Минералы системы Rh—Zn—Pt						
5	2/1-8.1	82.59	11.62	5.41	99.62	$(\text{Rh}_{0.80}\text{Zn}_{0.17}\text{Pt}_{0.03})_{1.00}$
6	3/2-10.1	64.99	21.88	12.90	99.77	$(\text{Rh}_{0.61}\text{Zn}_{0.32}\text{Pt}_{0.07})_{1.00}$
7	3/1-15.1	77.77	18.00	3.12	98.89	$(\text{Rh}_{0.72}\text{Zn}_{0.26}\text{Pt}_{0.02})_{1.00}$
8	3/3-1.1	72.63	16.99	9.70	99.32	$(\text{Rh}_{0.69}\text{Zn}_{0.26}\text{Pt}_{0.05})_{1.00}$
9	3/3-2.1	75.74	21.33	2.81	99.88	$(\text{Rh}_{0.69}\text{Zn}_{0.30}\text{Pt}_{0.01})_{1.00}$
10	3/3-3.1	85.64	7.29	5.93	98.86	$(\text{Rh}_{0.85}\text{Zn}_{0.12}\text{Pt}_{0.03})_{1.00}$

Пр и м е ч а н и е. Анализы № 5, 8 — выполнены методом волнодисперсионной рентгеновской спектроскопии (WDS), остальные — методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS).

ветственно (табл. 1). Данные рентгеноспектрального микроанализа позволяют отнести найденные фазы к трем типам соединений: MeS , MeS_2 и Me_2S_3 . Ранее В. В. Дистлером с соавторами (2003) был выделен еще один тип соединения таких сульфидов — Me_3S_4 , однако авторами среди выявленных фаз он не был обнаружен.

О генезисе платиноидной минерализации в хромитовых рудах. В разномасштабных хромитовых проявлениях в ультрамафитовых массивах различных регионов мира практически всегда присутствует акцессорная минерализация ЭПГ. Это доказывает существование определенных общих условий ее концентрирования совместно с хромом. В настоящее время такая пространственная и генетическая связь является общепризнанной (Талхаммер, 1996; Zhou et al, 1996; Melcher et al, 1997). Дискуссионным остается вопрос о происхождении хромититов и связанного с ними платиноидного оруденения. Хромитовые месторождения Кемпирсайского массива имеют гигантские размеры в сравнении с таковыми других офиолитовых комплексов мира, поэтому использование широко принятых концепций эволюции парагенезисов минералов ЭПГ в процессе офиолито- и рудообразования на данном массиве затруднительно. Концентрирование ЭПГ и хромшпинелидов, по-видимому, было связано с их мобилизацией из несмешиваемой рудно-силикатной жидкости, отделившейся от большого объема «материнского» лерцолитового субстрата (содержащего ЭПГ в состоянии рассеяния) в результате его частичного плавления. Дальнейшая судьба тугоплавких ЭПГ, очевидно, определялась их концентрированием совместно с иными компонентами, не участвующими в главном

процессе кристаллизации, и последующим отложением из высоконасыщенных надкритических флюидов. Наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru системы и находящиеся с ними в равновесии дисульфиды ряда лаурит—эрликманит. Твердые растворы Rh—Zn—Pt и минералы Ir—Ni—Cu сульфидной ассоциации могут быть связаны с повторными процессами частичного плавления и инъецированием новообразованного расплава в уже сформированные реститы (Талхаммер, 1996). Не исключено, что минералы Rh—Zn—Pt системы могли быть сформированы в ходе мантийного метасоматоза, когда при воздействии восстановленных флюидов мантийного происхождения происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ (Garuti, Zaccarini, 1997; Melcher et al, 1997; Ahmed, Arai, 2003; Киселева и др., 2014).

ВЫВОДЫ

1. В густовкрапленных хромититах хромитового месторождения «Алмаз-Жемчужина» Кемпирсайского ультрамафитового массива (Мугоджары, Казахстан) диагностированы и охарактеризованы две основные группы минералов ЭПГ: металлические твердые растворы ЭПГ и сульфиды ЭПГ. Первая группа представлена двумя системами: Os—Ir—Ru и Rh—Zn—Pt, а вторая — дисульфидами изоморфного ряда лаурит—эрликманит и минералами Ir—Ni—Cu сульфидной ассоциации. Большинство минералов ЭПГ образуют включения внутри зерен хромшпинелидов и формируют самостоятельные мелкие зерна с высокой степенью идиоморфизма. Только минералы системы Rh—Zn—Pt характеризуются низкой степенью идиоморфизма и представлены выделениями неправильной или вытянутой формы.

2. Среди металлических твердых растворов Os—Ir—Ru выявлены составы с повышенными концентрациями рутения (до 45 мас. %), хотя ранее считалось, что содержания данного элемента в обнаруженных фазах не превышает 10 мас. % (Дистлер и др., 2003). Это свидетельствует о более широких границах диапазона смесимости элементов триады.

3. Металлические твердые растворы системы Rh—Zn—Pt в хромитовом оруденении Кемпирсайского массива диагностированы впервые. За исключением ирарсита — единственного минерала, обогащенного родием (Дистлер и др., 1987) — другие минералы, содержащие в значимых количествах родий, в пределах кемпирсайских хромититов ранее не были установлены.

4. Основная тенденция фракционирования осмия, рутения и иридия в сульфидах заключается в том, что осмий и рутений обогащают дисульфиды, а иридий преимущественно концентрируется совместно с никелем и медью в сульфидах с различным соотношением металл—сера.

5. Главным фактором формирования платиноидной минерализации является флюидная мобилизация, концентрирование и отложение минералов ЭПГ. При этом авторы предполагают, что процесс формирования ассоциации выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. По-видимому, наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os—Ir—Ru и находящиеся с ними в равновесии дисульфиды ряда лаурит—эрликманит, а минералы Rh—Zn—Pt и Ir—Ni—Cu систем относятся к более поздним событиям изменения первичных минералов платиновых металлов. Эти события могли быть вызваны повторными процессами частичного плавления и инъецированием новообразованного расплава в уже сформированные рести-

ты либо, для минералов Rh—Zn—Pt системы, процессами мантийного метасоматоза, когда при воздействии восстановленных мантийных флюидов происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ.

Список литературы

Волченко Ю. А., Вигоров Б. Л. Первая находка акцессорных минералов платиновых металлов в хромитах Кемпирсай // Ежегодник Института геологии и геохимии Уральского отделения АН СССР. Сер. геол. **1987**. С. 70—71.

Гурская Л. И., Смелова Л. В., Колбанцев 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., Волченко Ю. А., Крячко В. В., Елпышев Г. А., Меркулов Г. А. Минералы платиновых металлов в хромититах Кемпирсайского массива, Южный Урал // Известия АН СССР. Сер. геол. **1987**. № 11. С. 113—117.

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.

Дистлер В. В., Фетисов В. А., Елпышев Г. А., Крячко В. В. Комплексное использование хромитовых руд // Горный журнал. **1990**. № 1. С. 6—7.

История развития Уральского палеоокеана / Ред. Л. П. Зоненшайн, В. В. Матвеев. Москва: Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, **1984**. 164 с.

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

Осипенко А. Б., Сидоров Е. Г., Костянов А. И., Толстых Н. Д. Хромититы гипербазитовых массивов п-ова Валижген, Корякия // Геология рудных месторожд. **2002**. Т. 44. № 1. С. 77—92.

Павлов Н. В., Григорьева И. И. Месторождения хрома / Рудные месторождения СССР. М.: Наука, **1974**. Т. 1. С. 168—220.

Сегедин Р. А. История открытия хромитовых месторождений Кемпирсайского массива // Уральский геологический журнал. **2001**. № 3 (21). С. 159—165.

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

Чаушунин И. С., Вотяков С. Л. Поведение элементов семейства железа, оксибарометрия и генезис уникальных хромитовых месторождений Кемпирсайского массива // Геология рудных месторожд. **2009**. Т. 51. № 2. С. 140—156.

References

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

Chashchukhin I. S., Votyakov S. L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in the Kempirsai massif. *Geol. Ore Deposits*. **2009**. Vol. 51. N 2. P. 123—138.

Distler V. V., Volchenko Yu. A., Kryachko V. V., Elpyshev G. A., Merkulov G. A. Minerals of platinum metals in chromitites of Kempirsai massif, Southern Urals. *Proc. Akad. Science USSR. Ser. Geol.* **1987**. N 11. P. 113—117 (in Russian).

Distler V. V., Kryachko V. V., Yudovskaya M. A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geol. Ore Deposits*. **2003**. Vol. 45. N 1. P. 37—65.

Distler V. V., Fetisov V. A., Elpyshev G. A., Kryachko V. V. Complex use of chromite ores. *Mining J.* **1990**. N 1. P. 6—7 (in Russian).

Fershtater G. B. Magmatism in the epochs of ural paleocean closure and mobile belt development: composition, distinctive evolutionary features, and sources. *Petrology*. **2013**. Vol. 21. N 2. P. 181—202.

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).

History of development of Ural paleocean. Ed. by Zonenshain L. P., Matveyenkov V. V. Moscow: Shirshov Institute of Oceanology, USSR Acad. Sci., **1984**. 164 p. (in Russian).

Kiseleva O. N., Zhmodik S. M., Agafonov L. V., Belyanin D. K., Damdinov B. B. Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoy and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 2. P. 259—272.

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.

Melher F., Stumpfl E. F., Distler V. V. Chromite deposits of the Kempirsai massif, southern Urals, Kazakhstan. *Inst. Mining Metall.* **1994**. Vol. 103. P. 107—120.

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. N. 1. P. 69—83.

Pavlov N. V., Grigorieva I. I. Deposits of chromium. In: *Ore deposits of USSR*. Moscow: Nauka, **1974**. Vol. 1. P. 168—220 (in Russian).

Reed S. J. B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. N. Y.: Cambridge University Press, **2005**. 189 p.

Segedin R. A. History of discovery of chromite deposits of the Kempirsai massif. *Uralian Geol. J.* **2001**. N 3 (21). P. 159—165 (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**. N 1. P. 25—36 (in Russian).

Volchenko Yu. A., Vigorov B. L. The first discovery of accessory minerals of platinum metals in Kempirsai chromites. *Yearbook of Institute of Geol. Geochem. Ural Branch of USSR Acad. Sci. Geol. series*. **1987**. P. 70—71 (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 Geology Reviews*. **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
20 апреля 2018 г.