

Научная статья
УДК 549.27:553.086
doi: 10.17223/25421379/37/7

НЕНАЗВАННАЯ ФАЗА (Rh,Zn,Pt) ИЗ ПОДИФОРМНЫХ ХРОМИТИТОВ – НОВЫЙ МИНЕРАЛЬНЫЙ ВИД?

Алексей Николаевич Юричев¹, Евгений Владимирович Корбовяк²

^{1,2} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ juratur@yandex.ru

² evgenij271@mail.ru



Аннотация. Объектом исследования является новая неназванная фаза (Rh,Zn,Pt), выявленная и изученная авторами в подиформных хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал), ультрамафитового массива Рай-Из (Полярный Урал) и Борусского ультрамафитового массива (Западный Саян) в период 2018–2025 гг. Она характеризуется выдержанным и крайне схожим химическим составом, обусловленным ведущей позицией родия (61,2–87,6 мас. %), при подчиненной роли цинка (7,2–24,1 мас. %) и платины (1,3–17,9 мас. %). Пересчет на кристаллохимическую формулу позволяет сделать предположение, что выявленная неназванная фаза (Rh,Zn,Pt) может являться интерметаллидом родия со стехиометрической формулой (Rh,Pt)₂₋₃Zn, подобной формуле аваруита Ni₂₋₃Fe. Формирование данного интерметаллида связывается с более поздним, наложенным на реститовые ультрамафиты прогрессивно антигоритовым этапом метаморфизма, наиболее интенсивно проявившимся в катаклазированных хромититах.

Ключевые слова: Урал, Западный Саян, подиформные хромититы, неназванная фаза (Rh,Zn,Pt), химический состав, генезис

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWM-2025-0015).

Для цитирования: Юричев А.Н., Корбовяк Е.В. Неназванная фаза (Rh,Zn,Pt) из подиформных хромититов – новый минеральный вид? // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 106–116. doi: 10.17223/25421379/37/7

Original article
doi: 10.17223/25421379/37/7

UNNAMED PHASE (Rh,Zn,Pt) FROM PODIFORM CHROMITITES – A NEW MINERAL SPECIES?

Alexey N. Yurichev¹, Evgeny V. Korbovyak²

^{1,2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ juratur@yandex.ru

² evgenij271@mail.ru

Abstract. The object of the study is new unnamed phase (Rh,Zn,Pt) identified and studied by authors in podiform chromitites of the Kempirsay ultramafic massif (Southern Urals), the Rai-Iz ultramafic massif (Polar Urals), and Borussky ultramafic massif (Western Sayan) in period from 2018 to 2025. A review of Russian and foreign geological literature on this subject did not reveal any similar mineral phase in other geological objects. This phase in all studied objects is characterized by consistent and extremely similar chemical composition, due to leading position of rhodium (61.2–87.6 wt. %), with subordinate role of zinc (7.2–24.1 wt. %) and platinum (1.3–17.9 wt. %). The recalculation to the crystal-chemical formula allowed to make assumption that the identified mineral phase (Rh,Zn,Pt) may be rhodium intermetallide with variations of composition from (Rh,Pt)₃Zn to (Rh,Pt)₂Zn. At the same time, such phase with stoichiometric formula (Rh,Pt)₂₋₃Zn is similar to the avaruite formula Ni₂₋₃Fe. The formation of this intermetallide is associated with later progressive antigorite stage of metamorphism, which was most intensively expressed in cataclasized chromitites. This is evidenced by morphology of grains and peculiar spongy-porous structure of this PGE, its predominant occurrence in cataclasized and brecciated chromium spinel grains, as well as the intensive development of chlorite-kemmerite-magnetite aggregate in interstitial spaces and presence of antigorite in host ultramafic rocks.

Keywords: Ural, Western Sayan, podiform chromitites, unnamed phase (Rh,Zn,Pt), chemical composition, genesis

Source of financing: The research was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2025-0015).

For citation: Yurichev A.N., Korbovyak E.V. (2025) Unnamed phase (Rh,Zn,Pt) from podiform chromitites – a new mineral species?. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 106–116. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/37/7

Введение

В период с 2018 по 2025 г. в процессе изучения особенностей распределения платиноидов и их минеральных форм в подформных хромититах Урала, Западного и Восточного Саянов и Тувы, нами были неоднократно отмечены микровключения неназванной существенно родиевой фазы (Rh,Zn,Pt), упоминания о которой в научной литературе отсутствуют. При этом, если в одних ультрамафитовых массивах данная фаза отмечалась повсеместно, то в других, порой даже соседних ультрамафитовых массивах, входящих в один офиолитовый пояс, она не была диагностирована даже при самом внимательном подходе.

Первые находки неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) были сделаны нами в 2018 г. в хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал). Несколько позднее микровключения (Rh,Zn,Pt) были диагностированы в хромититах ультрамафитового массива Рай-Из Полярного Урала (2023 г.) и в локальных прожилках хромшпинелидов Борусского ультрамафитового массива Западного Саяна (2024 г.).

В работе рассматриваются результаты исследования данных находок: особенности локализации, химический состав и возможная кристаллохимическая формула, генетическая природа.

География обнаружения неназванной фазы

Впервые неназванная фаза (Rh,Zn,Pt) была диагностирована нами в густовкрапленных и сливных тектонизированных хромититах из карьера «Объединенный»

месторождения Алмаз-Жемчужина Кемпирсайского ультрамафитового массива, являющегося крупнейшим массивом ультрамафитов на юге Урала и хорошо известным благодаря своим уникальным по размеру месторождениям хромитов [Савельева, Белокрыс, 2012]. По химическому составу такие хромититы относятся к высокохромистому типу (табл. 1). Выявленная фаза представлена микроскопическими, преимущественно одиночными гипидиоморфными и сгустковатыми включениями размером до 10 мкм, которые обнаруживают тяготение к зонкам дезинтеграции во внутренней матрице зерен хромшпинелидов (рис. 1, 2). Всего найдено и изучено 42 зерна [Юричев, Чернышов, 2018].

Вторым крупным объектом обнаружения фазы (Rh,Zn,Pt) стал ультрамафитовый массив Рай-Из, являющийся крупным фрагментом Хадатинского офиолитового пояса Полярного Урала [Вахрушева и др., 2017]. В составе высокохромистых хромититов (табл. 1) двух его месторождений Центральное (центральная часть массива) и № 214 (юго-западная часть массива) выявлено более 80 самостоятельных зерен данного платиноида [Юричев и др., 2024]. Последний отнесен к «сквозным» минералам платиновой группы (МПГ), обнаруживающимся во всех структурных типах хромититов массива. Он наблюдается как в зернах хромшпинелидов, так и в силикатных (хлорит-серпентиновый агрегат) интерстициях между ними и формирует преимущественно гипидиоморфные (сгустковатые и вытянутые) зерна размером до 12 мкм, со своеобразной полосчатой, зернистой поверхностью (рис. 3, 4).

Таблица 1
Химический состав рудных хромшпинелидов, в которых выявлена неназванная фаза (Rh,Zn,Pt), мас. %

Table 1

Chemical composition of ore chromspinelides in which unnamed phase (Rh,Zn,Pt) is detected, wt. %

№ п/п	Образец	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeOtot	ZnO	Сумма
<i>Кемпирсайский массив (Южный Урал, Казахстан)</i>								
1	КМ-5-134	13,32	8,93	0,15	64,06	13,06	н.о.	99,52
2	КМ-6-55	12,55	8,62	0,20	63,29	14,94	н.о.	99,61
3	КМ-6-154	13,29	9,11	0,17	61,94	15,07	н.о.	99,58
<i>Рай-Из массив (Полярный Урал, Россия)</i>								
4	P-1-178	16,08	13,39	н.о.	53,14	17,43	н.о.	100,05
5	P-2-125	15,21	12,00	н.о.	59,79	12,37	н.о.	99,37
6	P-2-209	8,12	3,70	н.о.	68,24	19,43	0,23	99,72
7	P-4-50	13,83	9,38	н.о.	61,69	14,61	н.о.	99,51
8	P-4-60	9,47	7,36	н.о.	67,47	15,33	0,19	99,82
9	Y-325/1-47	15,28	9,96	н.о.	61,64	13,40	н.о.	100,29
10	Y-325/1-93	10,75	7,82	н.о.	66,74	14,71	н.о.	100,02
11	Y-325/1-146	15,11	9,88	н.о.	61,35	13,57	н.о.	99,91
12	Y-325/1-147	15,37	10,00	н.о.	61,25	13,27	н.о.	99,90
<i>Борусский массив (Западный Саян, Россия)</i>								
13	Бр-131-11	16,50	23,55	н.о.	41,26	18,20	н.о.	99,52
14	Бр-131-4	15,90	26,98	н.о.	44,00	12,95	н.о.	99,83

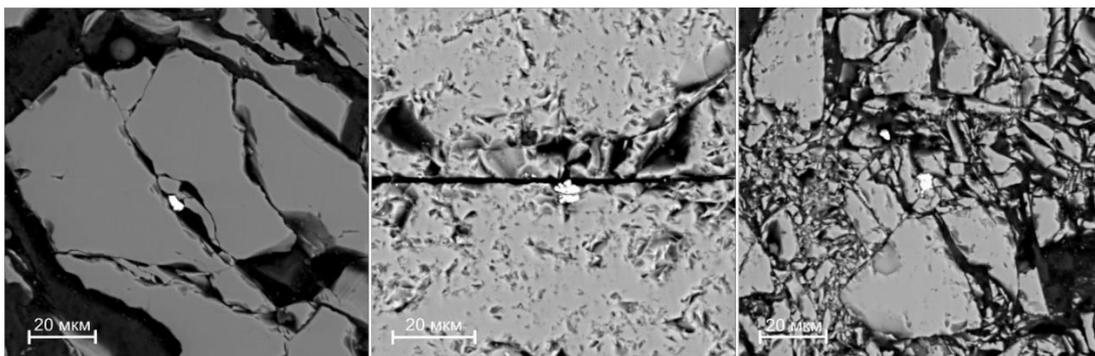


Рис. 1. Микровключения неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) в катаклазированных высокохромистых хромититах месторождения Алмаз-Жемчужина Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE)

Fig. 1. Microinclusions of unnamed phase (Rh,Zn,Pt) in cataclasized high-chromium chromitites of the Almaz-Zhemchuzhina deposit of Kempirsay ultramafic massif (Southern Urals) in BSE mode

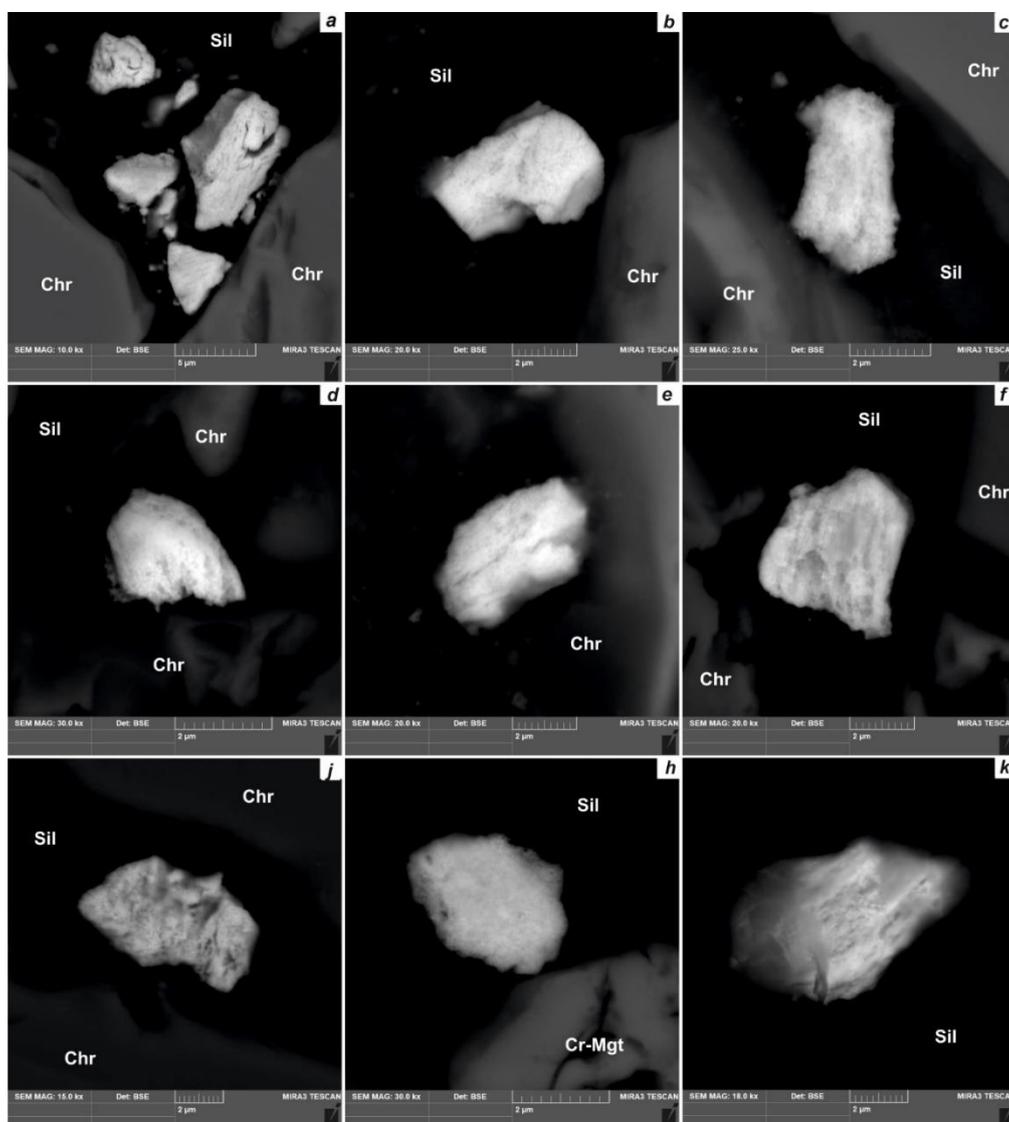


Рис. 2. Микрофотографии неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) в хромититах месторождения Алмаз-Жемчужина Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE)
Здесь и далее: Chr – хромшпинелид; Sil – силикатная (хлорит-серпентиновая) интерстиция

Fig. 2. Micrographs of unnamed phase (Rh,Zn,Pt) in chromitites from the Almaz-Zhemchuzhina deposit of Kempirsay ultramafic massif (Southern Urals) in BSE mode

Hereinafter: Chr – chromspinellide; Sil – silicate (chlorite-serpentine) interstitium

Последние находки фазы (Rh,Zn,Pt) сделаны нами в 2024 г. при изучении потенциальной платинометальной минерализации в хромшпинелидах Борусского ультрамафитового массива, являющегося крупнейшим в Алтае-Саянской складчатой области ультрамафитовым массивом [Гончаренко, 1989]. Хромшпинелиды в составе Борусского массива имеют высокоглиноземистый состав (см. табл. 1) и отмечаются преимущественно в виде акцессорной редкой вкрапленной минерализации в дунитах и гарцбургитах и значи-

тельно реже – в виде единичных средне-густовкрапленных прожил, в составе которых и была диагностирована неназванная фаза.

Последняя изучена на примере 9 зерен [Юричев, 2025], обнаруженных преимущественно в метаморфизованных деструктивных зернах хромшпинелида (каверны, брекчированные участки), и формирует, главным образом, гипидиоморфные зерна размером до 9 мкм, со своеобразной полосчатой, пористой поверхностью (рис. 5).

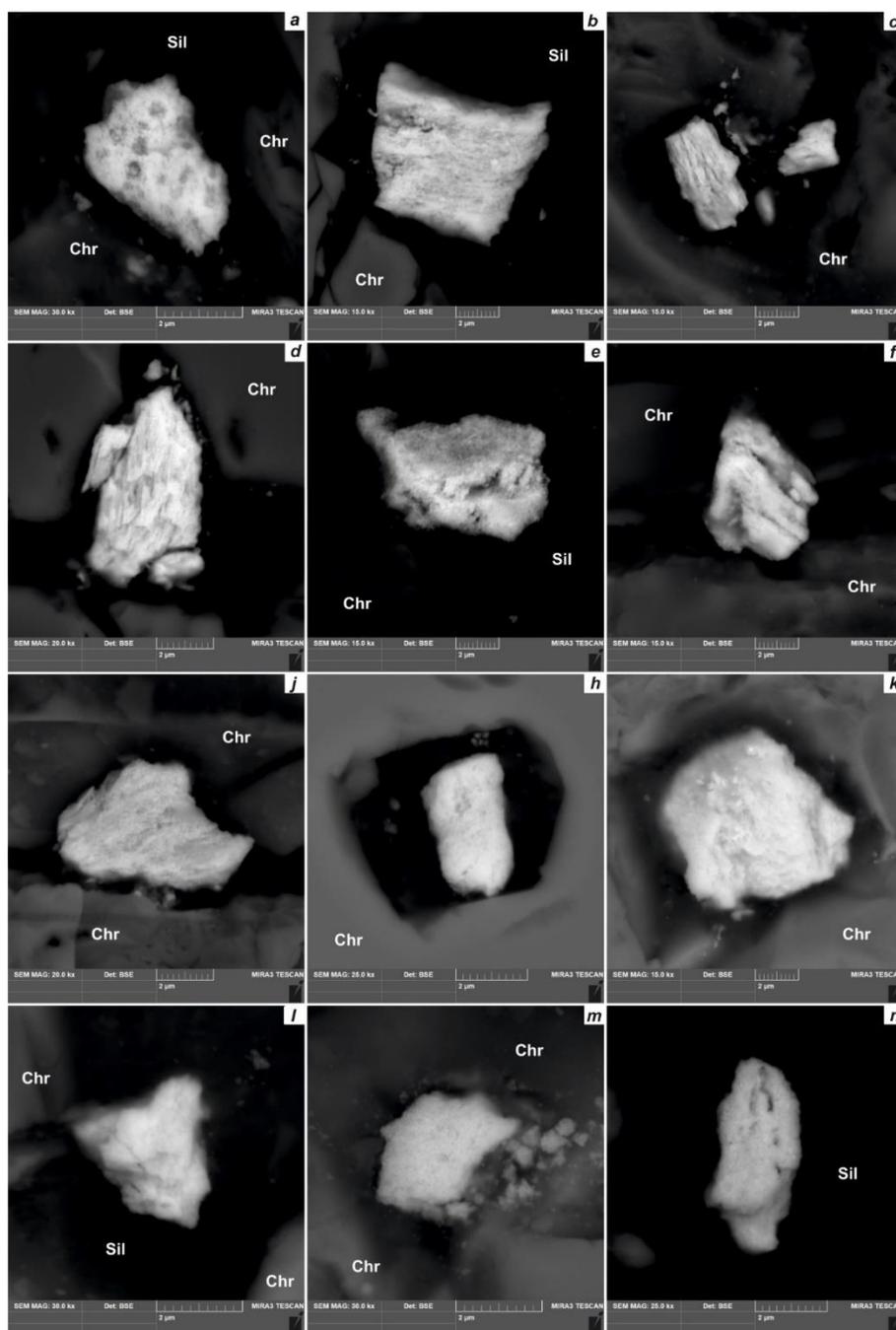


Рис. 3. Микрофотографии неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) в хромититах ультрамафитового массива Рай-Из (Полярный Урал) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE)

Fig. 3. Micrographs of unnamed phase (Rh,Zn,Pt) in chromitites of Ray-Iz ultramafic massif (Polar Urals) in BSE mode

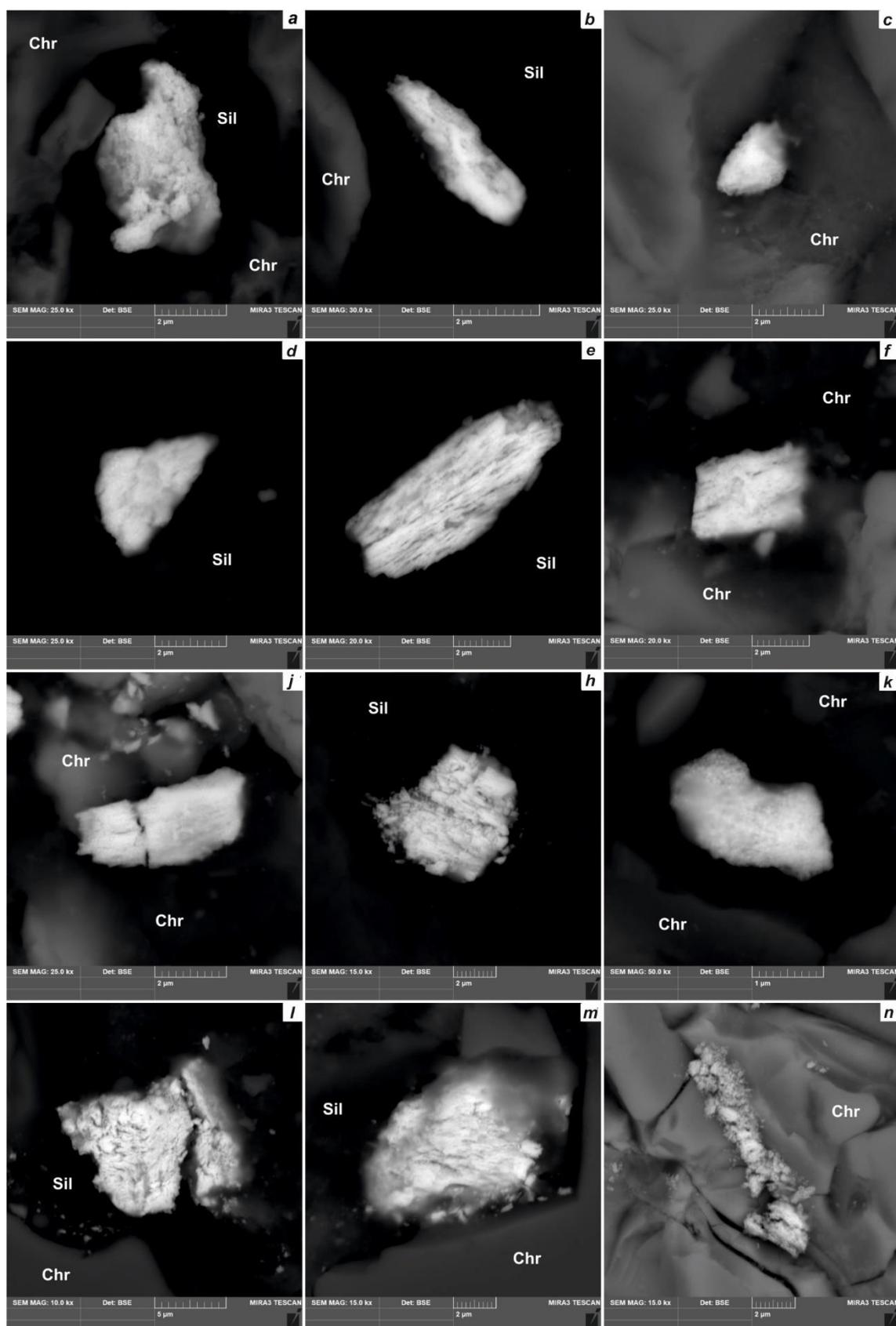


Рис. 4. Микрофотографии неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) в хромититах ультрамафитового массива Рай-Из (Полярный Урал) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE)

Fig. 4. Micrographs of unnamed phase (Rh,Zn,Pt) in chromitites of Ray-Iz ultramafic massif (Polar Urals) in BSE mode

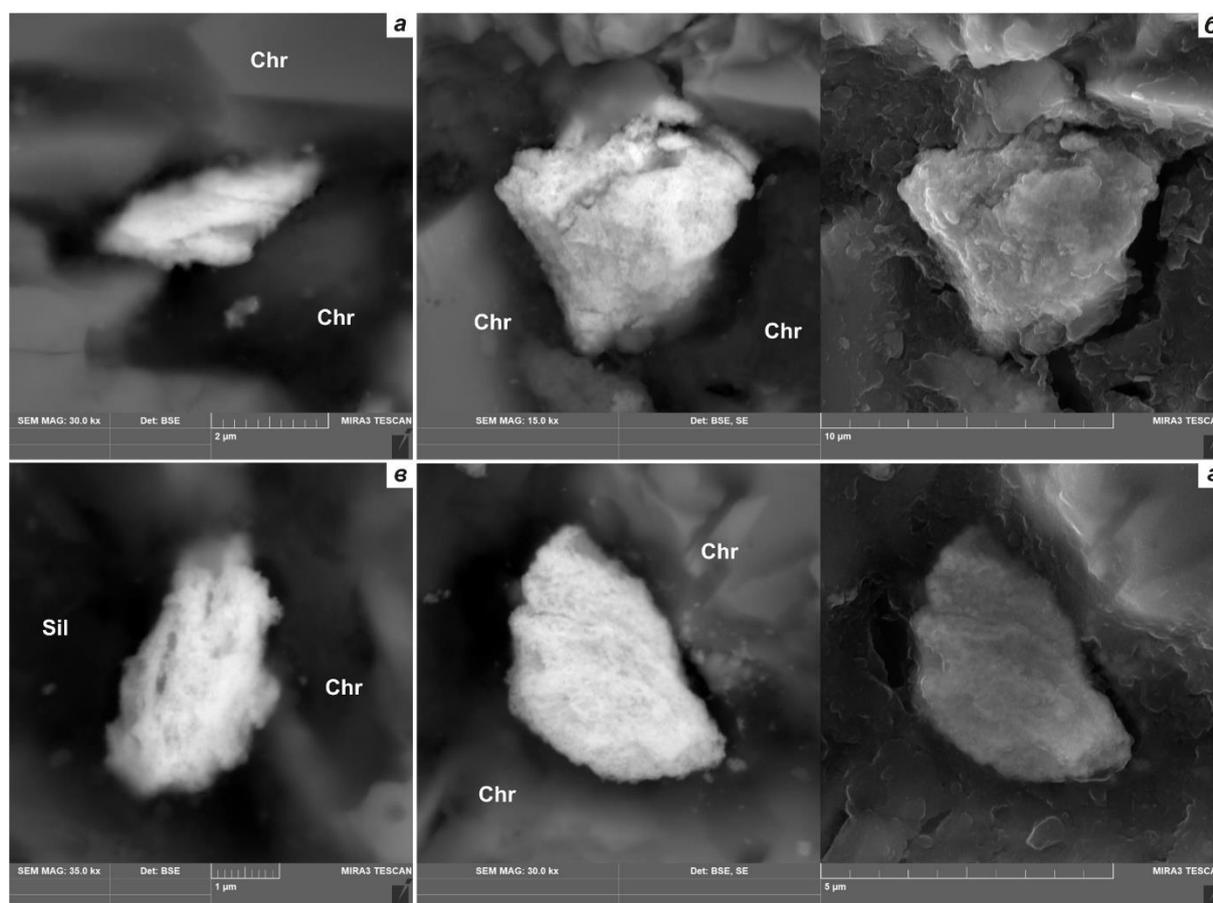


Рис. 5. Микрофотографии неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) в средне-густовкрапленных прожилках хромшпинелида в дунитах Борусского ультрамафитового массива (Западный Саян) в режиме обратно-рассеянных (BSE) и вторичных (SE) электронов

Fig. 5. Micrographs of unnamed phase (Rh, Zn, Pt) in medium-densely disseminated veins of chromspinelite in dunites of Borussky ultramafic massif (Western Sayan) in BSE and SE modes

В соответствии с задачами настоящего исследования был использован традиционный подход минералогического изучения рудных минералов с определением химического состава фаз рентгено-спектральным микроанализом, с применением метода растровой электронной микроскопии [Reed, 2005].

Последний метод включал изучение отдельных зерен и их агрегатов в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным анализатором UltimMax100 (Oxford Instruments).

Перед исследованием из отобранных образцов хромититов были изготовлены по два плоскопараллельных аншлифа толщиной 4–5 мм, с последующим напылением на их изучаемые поверхности слоя углерода толщиной 25–30 нм.

Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока пучка электронов 4,5 нА и времени накопления спектра в точке 60 с в

режиме «Point&ID». Область генерации характеристического рентгеновского излучения – 1–2 мкм. В качестве стандартов для Rh, Pt, Zn, Ni, Cu и Fe были применены чистые металлы. Использованы аналитические линии: La для Rh и Pt; Ka для Zn, Fe, Ni и Cu. Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с применением специализированной математической программы обработки полученных рентгеновских данных TrueQ, позволяющей достоверно производить деконволюцию перекрывающихся линий рентгеновского спектра.

Сокращением «н.о.» (не обнаружен) в таблицах химического состава минералов обозначены измерения ниже чувствительности микроанализа, которая при рентгеноспектральном микроанализе, как правило, не превышает первых сотых долей процента. Пределы обнаружения конкретных элементов для отдельных минеральных разновидностей для удобства приведены в примечаниях к таблицам.

Все исследования выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Химический состав неназванной фазы

Полученные химические составы показывают, что фаза (Rh,Zn,Pt) во всех трех изученных объектах, несмотря на то, что в Кемпирсайском и Рай-Из массивах она выявлена в высокохромистых хромититах, а в Борусском массиве в высокоглиноземистых хромшпинелидах имеет близкий состав, обусловленный ведущей позицией родия (61,2–87,6 мас. %), при подчиненной роли цинка (7,2–24,1 мас. %) и платины (1,3–17,9 мас. %). В кемпирсайских хромититах также выяв-

лены двухэлементные Rh–Zn составы. В качестве примеси иногда обнаруживаются никель (до 0,2 мас. %), медь (до 0,3 мас. %) и железо (до 1,7 мас. %) (рис. 6, а; табл. 2).

Отмечается обратная зависимость между родием и цинком и родием и платиной: по мере уменьшения родия происходит увеличение двух последних элементов. При этом какой-либо зависимости между цинком и платиной не обнаружено (рис. 6).

Пересчет на кристаллохимическую формулу позволяет сделать предположение, что выявленная минеральная фаза (Rh,Zn,Pt) может являться интерметаллидом родия с вариациями состава от (Rh,Pt)₃Zn до (Rh,Pt)₂Zn. При этом такая фаза со стехиометрической формулой (Rh,Pt)₂₋₃Zn схожа с формулой аваруита Ni₂₋₃Fe.

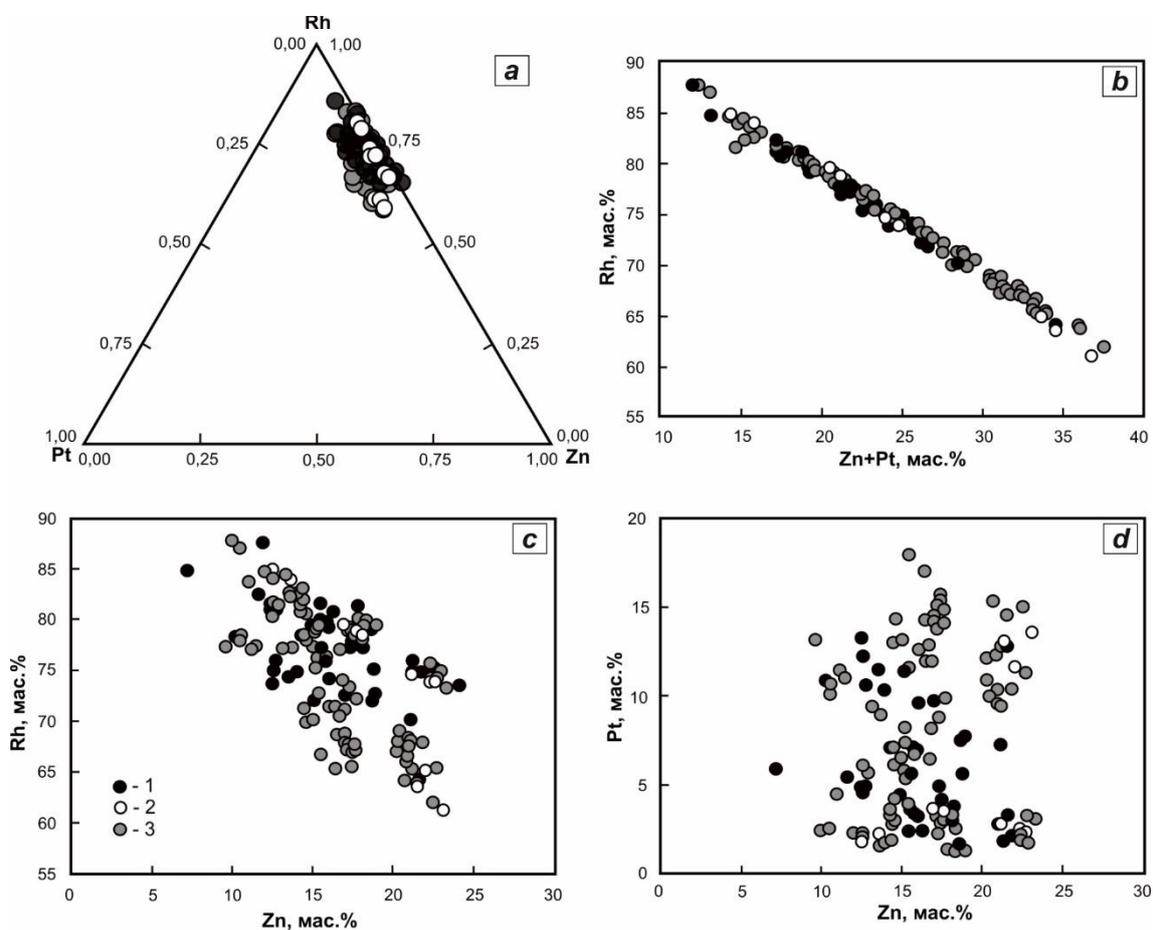


Рис. 6. Тройная (ат. доли) и бинарные (мас. %) диаграммы составов неназванной фазы (Rh,Zn,Pt) из подформных хромититов Урала и Западного Саяна

1 – Кемпирсайский массив; 2 – Борусский массив; 3 – массив Рай-Из

Fig. 6. Triple (at. fraction) and binary (wt.%) composition diagrams of unnamed phase (Rh,Zn,Pt) from podiform chromitites of the Urals and Western Sayan

1 – Kempirsay massif; 2 – Borussky massif; 3 – Rai-iz massif

Химический состав незванной фазы (Rh,Zn,Pt) из подформных хромититов Урала и Западного Саяна, мас. %

Chemical composition of unnamed phase (Rh, Zn, Pt) from podiform chromitites of the Urals and Western Sayan, wt. %

№ п/п	Массив	Образец	Rh	Zn	Pt	Ni	Cu	Fe	Сумма
1	Кемпирсайский массив (Южный Урал, Казахстан)	КМ-6-50	79,42	14,93	4,38	н.о.	н.о.	0,13	98,85
2		КМ-6-51	79,97	15,50	3,69	н.о.	н.о.	0,21	99,38
3		КМ-6-53	79,64	15,85	3,31	н.о.	н.о.	0,18	98,99
4		КМ-6-54	74,13	16,01	9,58	н.о.	н.о.	0,30	100,02
5		КМ-6-57	79,05	18,59	1,65	н.о.	н.о.	0,20	99,49
6		КМ-6-58	81,68	15,48	2,35	н.о.	н.о.	0,21	99,72
7		КМ-6-152	72,05	15,08	11,33	н.о.	н.о.	0,33	98,78
8		КМ-6-153	76,26	15,76	7,07	н.о.	н.о.	0,23	99,32
9		КМ-8-179	80,96	12,46	4,87	н.о.	н.о.	0,34	98,63
10		КМ-8-180	81,10	12,69	4,93	н.о.	н.о.	0,52	99,24
11		КМ-5-133	78,50	14,38	7,04	н.о.	н.о.	0,16	100,08
12		КМ-7-65	74,90	21,90	2,09	н.о.	н.о.	0,46	99,36
13		КМ-7-67	75,88	21,31	1,88	н.о.	н.о.	0,35	99,42
14		КМ-3-2	74,77	13,93	10,34	н.о.	н.о.	0,22	99,26
15		КМ-3-3	75,99	12,74	10,60	н.о.	н.о.	0,06	99,39
16		КМ-3-4	74,36	13,51	11,46	н.о.	н.о.	0,15	99,48
17		КМ-3-6	76,04	15,85	7,00	н.о.	н.о.	н.о.	98,89
18		КМ-3-7	77,42	17,36	4,91	н.о.	н.о.	н.о.	99,69
19		КМ-3-10	72,03	18,67	7,54	н.о.	н.о.	0,98	99,21
20		КМ-3-11	70,23	21,09	7,21	н.о.	н.о.	1,29	99,83
21		КМ-3-13	75,20	18,79	5,58	н.о.	н.о.	н.о.	99,57
22		КМ-3-14	77,77	17,45	4,18	н.о.	н.о.	н.о.	99,40
23		2/1-5.1	87,64	11,92	н.о.	н.о.	н.о.	0,52	100,08
24		2/1-8.1	82,52	11,61	5,41	н.о.	н.о.	0,33	99,87
25		3/2-13.1	81,32	17,79	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,11
26		3/2-10.1	64,21	21,62	12,74	н.о.	н.о.	0,35	98,92
27		939/545-6.1	73,55	24,09	н.о.	н.о.	н.о.	1,73	99,37
28		3/1-15.1	77,73	17,99	3,12	н.о.	н.о.	0,15	98,98
29		3/1-24.1	75,38	22,52	н.о.	н.о.	н.о.	0,82	98,72
30		3/3-1.1	72,61	16,99	9,70	н.о.	н.о.	0,09	99,39
31		3/3-2.1	74,92	21,10	2,78	н.о.	н.о.	0,34	99,14
32		3/3-3.1	84,85	7,23	5,87	н.о.	н.о.	1,68	99,63
		<i>Среднее (42)</i>	<i>76,97</i>	<i>16,35</i>	<i>5,70</i>				
33	Борусский массив (Западный Саян, Россия)	Бр-131-1	65,12	22,01	11,64	н.о.	н.о.	0,52	99,29
34		Бр-131-2	61,23	23,09	13,58	н.о.	н.о.	0,67	98,56
35		Бр-131-3	63,58	21,51	12,93	н.о.	н.о.	0,66	98,68
36		Бр-131-5	83,93	13,60	2,15	н.о.	н.о.	н.о.	99,68
37		Бр-131-6	84,88	12,50	1,83	н.о.	н.о.	н.о.	99,22
38		Бр-131-8	74,80	21,15	2,78	н.о.	н.о.	н.о.	98,73
39		Бр-131-9	73,99	22,63	2,35	н.о.	н.о.	н.о.	98,97
40		Бр-131-12	78,75	17,58	3,52	н.о.	н.о.	н.о.	99,84
41	Бр-131-14	79,53	16,87	3,61	н.о.	н.о.	0,13	100,14	
		<i>Среднее (11)</i>	<i>74,37</i>	<i>19,20</i>	<i>5,46</i>				
42	Рай-Из массив (Полярный Урал, Россия)	Р-1-169	83,13	14,36	1,86	н.о.	н.о.	н.о.	99,35
43		Р-1-171	79,35	17,26	2,29	н.о.	н.о.	н.о.	98,89
44		Р-1-172	79,02	17,43	2,83	н.о.	н.о.	н.о.	99,28
45		Р-1-175	71,14	16,94	11,95	н.о.	н.о.	н.о.	100,03
46		Р-1-177	68,88	17,03	14,09	н.о.	н.о.	н.о.	99,99
47		Р-2-123	67,50	17,65	14,88	н.о.	н.о.	н.о.	100,03
48		Р-2-143	74,61	22,31	1,80	н.о.	н.о.	н.о.	98,72
49		Р-2-145	75,12	22,94	1,71	н.о.	н.о.	н.о.	99,77
50		Р-2-203	69,08	20,43	9,99	н.о.	н.о.	н.о.	99,50
51		Р-2-204	67,11	20,24	12,09	н.о.	н.о.	н.о.	99,44
52		Р-2-207	80,14	17,86	1,32	н.о.	н.о.	н.о.	99,33
53		Р-4-46	84,71	12,03	2,26	н.о.	н.о.	н.о.	98,99
54		Р-4-49	87,08	10,52	2,51	н.о.	н.о.	н.о.	100,10
55		Р-4-55	64,14	20,69	15,26	н.о.	н.о.	н.о.	100,09
56		Р-4-56	66,50	20,89	12,30	н.о.	н.о.	н.о.	99,69
57	Р-4-57	62,05	22,55	14,99	н.о.	н.о.	н.о.	99,59	

№ п/п	Массив	Образец	Rh	Zn	Pt	Ni	Cu	Fe	Сумма
58		Y-4/3-12	78,00	18,16	3,32	н.о.	н.о.	н.о.	99,48
59		Y-4/3-29	74,16	22,78	3,26	н.о.	н.о.	н.о.	100,19
60		Y-4/3-30	73,26	23,28	3,04	н.о.	н.о.	н.о.	99,58
61		Y-4/3-63	78,50	14,44	7,06	н.о.	н.о.	н.о.	100,00
62		Y-4/3-64	79,12	15,26	5,36	н.о.	н.о.	н.о.	99,74
63		Y-325/1-40	77,23	13,69	8,92	н.о.	н.о.	н.о.	99,85
64		Y-325/1-42	77,99	10,52	10,75	н.о.	н.о.	н.о.	99,26
65		Y-325/1-44	80,61	14,60	4,21	н.о.	н.о.	н.о.	99,42
66		Y-325/1-45	76,26	15,30	7,36	н.о.	н.о.	н.о.	98,92
67		Y-325/1-120	67,96	21,85	10,36	н.о.	н.о.	н.о.	100,17
68		Y-325/1-189	77,03	16,74	6,42	н.о.	н.о.	н.о.	100,19
69		Y-340/7-70	71,33	14,48	13,02	н.о.	н.о.	н.о.	98,83
70		Y-340/7-71	77,23	13,18	9,36	н.о.	н.о.	н.о.	99,77
71		Y-340/7-72	77,36	9,64	13,14	н.о.	н.о.	н.о.	100,14
72		Y-340/7-73	66,91	17,38	15,18	н.о.	н.о.	н.о.	99,48
73		Y-340/7-159	65,58	17,42	15,70	н.о.	н.о.	н.о.	98,69
74		Y-340/7-160	72,78	15,38	11,52	н.о.	н.о.	н.о.	99,68
75		Y-399/2-4	83,74	11,02	4,51	н.о.	н.о.	н.о.	99,26
76		Y-399/2-6	81,35	12,87	5,66	н.о.	н.о.	н.о.	99,88
77		Y-399/2-16	66,73	15,46	17,92	н.о.	н.о.	н.о.	100,10
78		Y-399/2-17	77,39	11,49	10,95	н.о.	н.о.	н.о.	99,83
79		Y-399/2-19	65,29	16,42	16,97	н.о.	н.о.	н.о.	98,68
80		Y-340/7-96	65,31	21,20	12,78	0,26	н.о.	н.о.	99,56
81		Y-340/7-97	66,00	20,85	12,26	0,24	н.о.	н.о.	99,34
82		Y-340/7-98	68,07	20,29	10,84	0,26	н.о.	н.о.	99,47
83		P-1-167	78,89	15,16	5,80	н.о.	0,22	н.о.	100,07
84		P-1-168	84,45	13,30	1,86	н.о.	0,16	н.о.	99,77
85		Y-325/1-90	72,22	17,69	9,85	н.о.	0,31	н.о.	100,07
86		Y-325/1-92	74,10	16,88	8,17	н.о.	0,28	н.о.	99,43
87		Y-399/2-25	69,98	14,59	14,36	н.о.	н.о.	0,53	99,45
88		Y-399/2-26	68,70	16,54	14,28	н.о.	н.о.	0,59	100,11
89		Y-399/2-27	67,08	17,66	14,11	н.о.	н.о.	0,68	99,53
90		Y-399/2-80	81,89	14,42	2,78	н.о.	н.о.	0,64	99,74
91		Y-399/2-81	78,09	14,54	6,11	н.о.	н.о.	0,72	99,46
92		Y-399/2-82	67,20	17,19	13,81	н.о.	н.о.	1,39	99,59
93		Y-399/2-83	70,11	14,96	13,09	н.о.	н.о.	1,21	99,37
94		Y-399/2-85	80,79	14,59	3,03	н.о.	н.о.	1,09	99,50
95		Y-325/1-142	82,56	14,04	1,75	н.о.	н.о.	1,49	99,84
96		Y-325/1-145	82,71	13,60	2,08	н.о.	н.о.	1,28	99,66
		<i>Среднее (85)</i>	<i>74,76</i>	<i>16,51</i>	<i>8,06</i>				

В некоторых работах [Gross et al., 2001; Гаркуль, 2023] имеются данные об образовании интерметаллидных фаз $Zn_{11}Rh_2$, $Zn_{13}Rh$ и $ZnRh$. Таким образом, стоит подчеркнуть, что несмотря на малую освещенность системы $Zn-Rh$ в литературе, из-за критически низкой растворимости цинка и родия друг в друге, объясняемую разностью кристаллических решеток, образование интерметаллидов и твердых растворов между этими двумя металлами в природе возможно.

О происхождении незазванной фазы

Образование незазванного интерметаллида родия $(Rh,Pt)_{2-3}Zn$ авторы предварительно склонны связывать с более поздним наложенным прогрессивно антигоритовым этапом метаморфизма [Макеев, 1992; Макеев и др., 1999]. Об этом свидетельствует морфо-

логия зерен и своеобразная губчато-пористая структура данного МПГ, его обнаружение преимущественно в катаклазированных, брекчированных зернах хромшпинелидов, а также интенсивное развитие в интерстициях хлорит-кеммерерит-магнетитового агрегата и присутствие антигорита во вмещающих ультрамафитовых породах.

Отнесение к данному этапу метаморфического преобразования обнаруженного интерметаллида также подтверждается тем, что цинковые минералы, в том числе вюртцит и природная латунь (цинкистая медь) диагностируются именно в антигоритовых серпентинитах [Макеев и др., 1999; Yang et al., 2015]. При этом привнос цинка, вероятно, мог осуществляться и из зерен хромшпинелидов, где его содержание, по нашим и ранее полученным данным, может составлять до 0,4 мас. % [Вахрушева и др., 2017; Юричев и др., 2024].

Выводы

1. МПП с цветными металлами неоднократно выделялись в подформных хромититах офиолитовых комплексов [Дистлер и др., 2003; Гурская и др., 2004; Yang et al., 2015; Юричев и др., 2019], однако подобные соединения со значимой ролью цинка и главенствующей концентрацией родия (до 87 %), по нашему мнению, диагностированы впервые. Обзор геологической российской и зарубежной литературы по данному вопросу обнаружить аналогичную минеральную фазу в других геологических объектах не позволил.

2. Неназванная фаза (Rh,Zn,Pt), обнаруженная к настоящему времени в трех реститовых ультрамафи-

товых массивах (Кемпирсайский, Рай-Из, Борусский), в разных складчатых структурах (Урал, Западный Саян) и в разных по составу хромититах (высокохромистых и высокоглиноземистых), характеризуется выдержанным и крайне схожим химическим составом.

3. Как показывают кристаллохимические расчеты, выявленная минеральная фаза, вероятно, может являться интерметаллидом родия с кристаллохимической формулой (Rh,Pt)₂₋₃Zn.

Формирование данного интерметаллида связывается с более поздним, наложенным на реститовые ультрамафиты прогрессивно антигоритовым этапом метаморфизма, который наиболее интенсивно проявился в катаклазированных хромититах.

Список источников

- Савельева Г.Н., Белокрыз А.М. Хромиты – руда, рожденная в мантии Земли // Природа. 2012. № 11. С. 14–23.
- Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Петрология и хромитонность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
- Гаркуль И.А. Двойные комплексные оксалаты Pd и Rh с 3d-металлами как предшественники биметаллических систем : дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2023. 135 с.
- Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1989. 404 с.
- Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Шахова С.Н. Платиноиды хромитонных массивов Полярного Урала. СПб. : Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
- Дистлер В.В., Крячко В.В., Юдовская М.А. Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 1. С. 44–74.
- Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб. : Наука, 1992. 197 с.
- Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И., Крапля Е.А. Геолого-минералогическая модель эволюции платиноносных альпинотипных ультрабазитов Урала / Платина России. Т. IV. М. : Геоинформмарк, 1999. С. 176–183.
- Юричев А.Н. Интерметаллид (Rh,Pt)₂₋₃Zn из Борусского ультрамафитового массива (Западный Саян) – новый минеральный вид? / Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. М. : ЦНИГРИ, 2025. С. 477–479.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И. Платиноиды системы Rh-Zn-Pt из хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Южный Урал, Казахстан) // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 10. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2018. С. 445–446.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В. Минералы платиновой группы из хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Мугоджары, Казахстан): новые данные // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148, № 2. С. 76–86.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В. Минералы платиновой группы из хромитовых руд ультрамафитового массива Рай-Из (Полярный Урал): новые данные // Записки Российского минералогического общества. 2024. Ч. CLIII. № 6. С. 64–93.
- Gross N., Kotzyba G., Künnen B., Jeitschko W. Binary Compounds of Rhodium and Zinc: RhZn, Rh₂Zn₁₁, and RhZn₁₃ // Z. Anorg. Allg. Chem. 2001. V. 627. P. 155–163.
- Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. N.Y. : Cambridge University Press, 2005. 189 p.
- Yang J., Meng F., Xu X., Robinson P.T., Dilek Y., Makeyev A.B., Wirth R., Wiedenbeck M., Cliff J. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Is ophiolite of the Polar Urals // Gondwana Research. 2015. V. 27, № 2. P. 459–485.

References

- Savelyeva G.N., Belokryz A.M. *Chromites – ore born in the Earth’s mantle* // Nature. 2012. No. 11. pp. 14–23. In Russian
- Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. *Petrologiya i hromitonosnost' ul'traosnovnogo massiva Raj-Is (Polyarnyj Ural)* [Petrology and chromite content of the Rai-Is ultramafic massif (Polar Urals)]. Ekaterinburg: IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017. 265 p. In Russian
- Garkul I.A. *Dvoynye kompleksnye oksalaty Pd i Rh s 3d-metallami kak predshestvenniki bimetallicheskikh sistem* [Double complex oxalates of Pd and Rh with 3d metals as precursors of bimetallic systems]. Diss. ... cand. Chem. Sc. Novosibirsk, 2023. 135 p. In Russian
- Goncharenko A.I. *Deformatsiya i petrostrukturnaya evolyuciya al'pinotipnyh giperbazitov* [Deformation and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites]. Tomsk: Publishing house Tom. Univ., 1989. 404 p. In Russian
- Gurskaya L.I., Smelova L.V., Kolbantsev L.R., Lyakhnitskaya V.D., Lyakhnitsky Yu.S., Shakhova S.N. *Platinoidy hromitonosnykh massivov Polyarnogo Urala* [Platinoids of chromite-bearing massifs of the Polar Urals]. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg cart factory VSEGEI, 2004. 306 p. In Russian

Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsay ore field // *Geology of Ore Deposits*. 2003. V. 45(1). pp. 37–65.

Makeev A.B. *Mineralogiya al'pinotipnyh ul'trabazitov Urala* [Mineralogy of alpine-type ultrabasites of the Urals]. St. Petersburg: Nauka, 1992. 197 p. In Russian

Makeev A.B., Brianchaninova N.I., Kraplya E.A. *Geologo-mineralogicheskaya model' evolyucii platinonosnyh al'pinotipnyh ul'trabazitov Urala* [Geological and mineralogical model of the evolution of platinum-bearing alpine-type ultrabasites of the Urals] / *Platina of Russia*. V. IV. Moscow: Geoinformmark, 1999. pp. 176–183. In Russian

Yurichev A.N. *Intermetallid (Rh,Pt)₂₋₃Zn iz Borusskogo ul'tramafitovogo massiva (Zapadnyy Sayan) – noviy mineral'niy vid?* [Intermetallic compound (Rh,Pt)₂₋₃Zn from the Borussky ultramafic massif (Western Sayan) – a new mineral species?] / *Geology, forecast, prospecting and evaluation of deposits of diamonds, precious and non-ferrous metals*. Moscow: TsNIGRI, 2025. pp. 477–479. In Russian

Yuricheva A.N., Chernyshov A.I. *Platinoidy sistemy Rh-Zn-Pt iz hromititov Kempirsajskogo ul'tramafitovogo massiva (YUzhnyy Ural, Kazahstan)* [Platinoids of the Rh-Zn-Pt system from chromitites of the Kempirsay ultramafic massif (Southern Urals, Kazakhstan)] / *Petrology of igneous and metamorphic complexes*. V. 10. Tomsk: Publishing house of Tomsk CNTI, 2018. pp. 445–446. In Russian

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. *Mineraly platinovoy gruppy iz hromititov Kempirsajskogo ul'tramafitovogo massiva (Mugodzhary, Kazahstan): novye dannye* [Platinum group minerals from chromitites of the Kempirsay ultramafic massif (Mugodzhary, Kazakhstan): new data] // *Notes of the Russian Mineralogical Society*. 2019. V. 148, No. 2. pp. 76–86. In Russian

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. *Mineraly platinovoy gruppy iz hromovyh rud ul'tramafitovogo massiva Ray-Iz (Polyarniy Ural): novye dannye* [Platinum group minerals from chromium ores of the Rai-Iz ultramafic massif (Polar Urals): new data] // *Notes of the Russian Mineralogical Society*. 2024. V. 153, No. 6. pp. 64–93. In Russian

Gross N., Kotzyba G., Künnen B., Jeitschko W. Binary Compounds of Rhodium and Zinc: RhZn, Rh₂Zn₁₁, and RhZn₁₃ // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2001. V. 627. pp. 155–163.

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

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

Информация об авторах:

Юричев А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: juratur@yandex.ru

Корбовьяк Е.В., инженер-исследователь, ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: evgenij271@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Yurichev A.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Petrography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: juratur@yandex.ru

Korbovyak E.V., Research Engineer, Collective Use Center «Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems», National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: evgenij271@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.05.2025; одобрена после рецензирования 13.09.2025; принята к публикации 20.11.2025

The article was submitted 03.05.2025; approved after reviewing 13.09.2025; accepted for publication 20.11.2025