

УДК 549.27:549.3 (470.5)

СРОСТКИ МИНЕРАЛОВ ЭПГ В МИАССКОЙ РОССЫПНОЙ ЗОНЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) И ИХ КОРЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

**В.В. Зайков^{1,2}, И.Ю. Мелекесцева¹, В.А. Котляров¹,
Е.В. Зайкова¹, Ю.Д. Крайнев¹**

¹*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; zaykov@mineralogy.ru*
²*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе*

INTERGROWTHS OF PLATINUM GROUP MINERALS FROM THE MIASS PLACER ZONE (SOUTH URALS) AND THEIR PRIMARY SOURCES

V.V. Zaykov^{1,2}, I.Yu. Melekestseva¹, V.A. Kotlyarov¹, E.V. Zaykova¹, Yu.D. Kraynev¹

¹*Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; zaykov@mineralogy.ru*
²*National Research South Ural State University, Miass branch, Miass*

В Киалимской и Малоиремельской золотых россыпях Миасской россыпной зоны на Южном Урале найдено 24 минерала элементов платиновой группы (ЭПГ). Родарсенит, боуит, купрородсит и ксингцхонгит(?) на Урале обнаружены впервые. В Киалимской россыпи преобладает рутений, содержащий включения изоферроплатины, железистой платины, лаурита, медистого золота, толовкита(?), хизлеводита и неназванного минерала RhSbS. Осмий содержит включения эрликманита и лаурита; иридий – неназванных сульфидов и сульфидоарсенидов ЭПГ, состав которых близок к (Ir,Rh,Ni)S и (Ir,Os)₃S₂. Зёрна изоферроплатины из Малоиремельской россыпи содержат включения лаурита, родарсенита, боуита, миассита(?) и неназванного сульфида платины и антимонида палладия, близких по составу к PtS₂ и Pd₃Sb, соответственно. Рутений содержит включения изоферроплатины, лаурита, ирарсита и рутенарсенита, осмий – железистой платины, иридий – хонгшиита(?). В Малоиремельской россыпи установлено три типа сростков минералов ЭПГ: 1) пластинчатые кристаллы рутения с изоферроплатиной и туламинитом(?); 2) решётчатые срастания пластинчатых кристаллов рутения с интерстициальными агрегатами золота, изоферроплатины, лаурита и ксингцхонгита(?); 3) сростки осмия с ирарситом и иридарсенитом, развитые по спайности осмия. Источником минералов ЭПГ в изученных золотых россыпях являются массивы альпинотипных гипербазитов (Карабашский, Таловский, Нуралинский).

Ключевые слова: сростки, минералы элементов платиновой группы, россыпи, Южный Урал.

Илл. 12. Табл. 2. Библ. 38.

Twenty four platinum group minerals (PGMs) were found in the Kialim and Maly Iremel gold placers of the Miass placer zone, South Urals. Rhodarsenite, bowieite, cuprorhodite, and xingzhongite(?) were found in the Urals for the first time. In the Kialim placer, ruthenium is most abundant PGM, which hosts microinclusions of isoferroplatinum, ferroan platinum, laurite, cupriferous gold, tolovkite(?), heazlewoodite and unnamed mineral RhSbS. The osmium contains microinclusions of erlichmanite and laurite. The iridium grains include various sulfides and arsenides of platinum group elements (PGEs) close in compositions to (Ir,Rh,Ni)S and (Ir,Os)₃S₂. The isoferroplatinum from the Maly Iremel placer hosts laurite, rhodarsenite, bowieite, miassite(?) and unnamed Pt sulfide and Pd antimonide close in compositions to PtS₂ и Pd₃Sb, respectively. Ruthenium is a host to isoferroplatinum, PGE sulfides and arsenides and heazlewoodite. Osmium contains microinclusions of ferroan platinum; iridium is a host to hongshiite(?). Three types of PGM intergrowths were identified in the

Maly Iremel samples: 1) the intergrowths of platy crystals of ruthenium with isoferroplatinum and tulameenite(?); 2) the open-lattice-work intergrowths of platy crystals of ruthenium with interstitial aggregates of gold, isoferroplatinum, laurite and xingzhongite(?) and 3) the intergrowths of osmium and irarsite and iridarsenite, which are developed along cleavage of the osmium grains. The placer PGMs derived from adjacent ophiolitic ultramafic massifs (Karabash, Talovka, Nurali).

Key words: intergrowths, platinum group minerals, placers, South Urals.

Figures 12. Tables 2. References 38.

Введение

К числу слабо освещённых вопросов минералогии россыпей относится характеристика сростков минералов элементов платиновой группы (ЭПГ) с другими минералами (микрорагенезисов). При изучении Миасской россыпной зоны на Южном Урале среди минералов ЭПГ (МПГ) нами были обнаружены разнообразные сростки, которые позволяют детализировать последовательность их образования и определить их источники. К настоящему времени информация о МПГ в россыпях Южного Урала крайне ограничена: чаще всего эти минералы лишь фиксировались при добычных работах. Присутствие МПГ осмиево-иридиевого и иридиевого состава (реже – платины и поликсена) отмечено в 11 россыпных зонах (Петров, 1999ф; Иванищев, 2005ф; Салихов и др., 2001; Попова, 2002; Баранников, 2006). Начало детального изучения состава МПГ из россыпей было положено в работе В.В. Зайкова с соавторами (2010), где охарактеризованы минералы Киалимской россыпи – рутений с микровключениями сульфида рутения, а также сульфоантимониды иридия и рутения. Результаты наших исследований позволят уточнить последовательность кристаллизации МПГ изученных россыпей, а также определить их возможные источники.

Миасская россыпная зона приурочена к Главному Уральскому разлому (Серавкин, 2010), по которому соприкасаются палеозойские структуры Уральского палеоокеана и докембрийские Восточно-Европейского континента (рис. 1). Главный Уральский разлом шириной 10–20 км с оперяющими дизъюнктивами относится к категории сутурных зон и вмещает тела альпинотипных гипербазитов, фрагменты океанической коры и островодужных построек девонского возраста, палеозойские гранитоидные массивы (Пучков, 2000). Такое сочетание геологических комплексов обусловило присутствие разнообразной минерализации: золоторудной и золото-россыпной, хромитовой, платиноидной, железорудной (Koroteev et al., 1997; Овчинников, 1998).

Миасская россыпная зона является наиболее богатой и протяжённой на Южном Урале (см. рис. 1). В её состав входят 136 золотоносных россыпей в долине р. Миасс, в которых добыто около 140 т золота (Петров, 1999; Иванищев, 2005ф). В последние годы разработка проводилась с помощью драг. Во многих россыпях были найдены многочисленные самородки, в том числе самый крупный в России «Большой треугольник» весом 32.06 кг, который хранится в Алмазном фонде РФ. В плотике россыпи находится Мелентьевское золото-сульфидное месторождение (Зайков, 1988; Попова и др., 2005).

Формирование россыпей в Миасской зоне началось в мезозое в условиях тектонической стабильности, а также тёплого и влажного климата в связи с формированием кор выветривания. Речные системы наследовали ослабленные зоны литологических и тектонических контактов, в результате чего были образованы субмеридиональные эрозионно-структурные депрессии (Шуб и др., 1993). В неогене из-за поднятия Уральских гор часть речных долин приобрела субширотную и диагональную ориентировку. Аллювиальные россыпи в этих реках возникли, в основном, за счёт перемыва палеогеновых золотоносных отложений. В это время установился умеренно семиаридный климат, шёл интенсивный смыв рыхлых образований, широкое развитие получила разветвлённая ложковая сеть. В её пределах нередко присутствуют высокопродуктивные россыпи золота делювиально-пролювиального типа.

В четвертичное время активизировались денудационные процессы и сформировались речные системы современных очертаний. Климат сменился на умеренно холодный и холодный гумидный. Роль металла, унаследованного из древних золотоносных отложений, на этом этапе была определяющей. Наиболее богатые по содержанию и запасам плиоцен-четвертичные россыпи аллювиального и аллювиально-делювиального генезиса локализируются в пределах контуров современной гидросети,

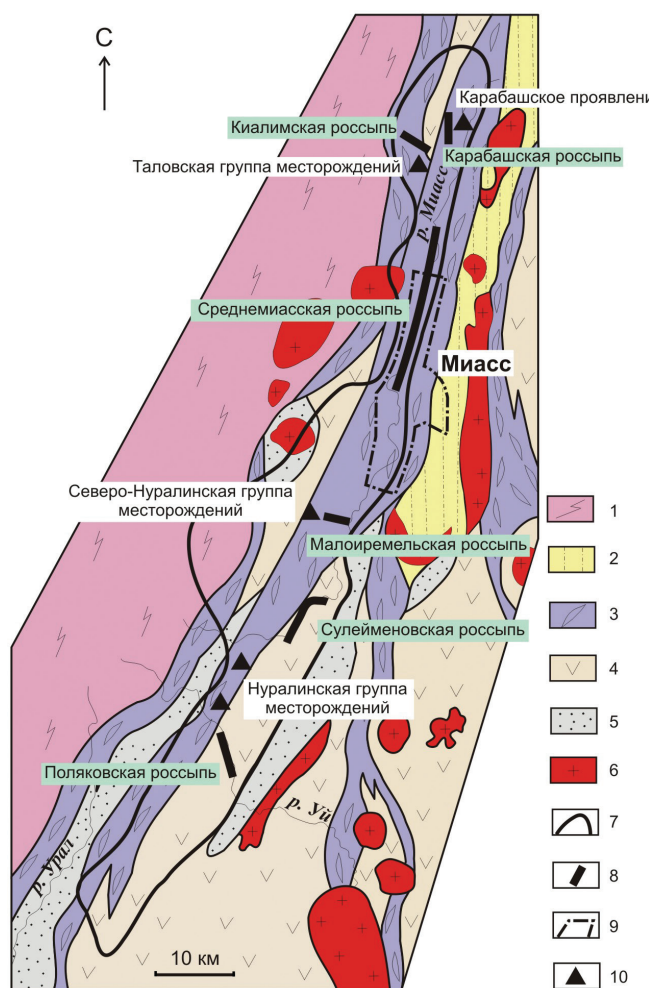


Рис. 1. Схема геологического строения Миасской россыпной зоны (по: Ленных, Нестоянова, 1956), с изменениями.

1 – протерозойские метаморфические сланцы; 2 – венд-кембрийские сланцы и амфиболиты; 3 – палеозойский офиолитовый меланж с ультрамафитами; 4 – силурийско-девонские островодужные комплексы; 5 – девонско-карбоновые осадочные комплексы; 6 – палеозойские гранитоиды; 7 – контур Миасской россыпной зоны; 8 – основные россыпи, содержащие минералы ЭПГ; 9 – территория г. Миасс; 10 – месторождения и рудопроявления хромита.

Fig. 1. Schematic structure of the Miass placer zone (after Lennykh, Nestoyanova, 1956) is modified.

1 – Proterozoic metamorphic schists; 2 – Vendian to Cambrian schists and amphibolites; 3 – Paleozoic ophiolitic mélange with ultramafic massifs; 4 – Silurian to Devonian island-arc complex; 5 – Devonian to Carboniferous sedimentary complex; 6 – Paleozoic granitic rocks; 7 – contour of Miass placer zone; 8 – major PGM-bearing gold placers; 9 – territory of Miass; 10 – deposits and occurrences of chromite.

наследующих эрозионно-структурные депрессии. Основными типами россыпей являются долинные, террасовые и русловые (Рожков, 1948). Первые залегают на общем для всей долины основании, вторые относятся к первой, второй и третьей террасам.

Методы исследований

Материал для исследований был предоставлен ООО «Миасский прииск» и В.В. Мурзиным (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) в виде концентратов, содержащих МПГ. Изучение их морфологии и строения проведено в Институте минералогии УрО РАН на микроскопах Axiolab (Carl Zeiss) и Olympus BX-51. МПГ изучены в 142 зёрнах из Киалимской и Малоиремельской россыпей. Состав минералов определён на сканирующих электронных микроскопах с ЭДС РЭММА 202М (аналитик В.А. Котляров) и Tescan Vega 3 (аналитик И.А. Блинов). СЭМ РЭММА 202М оборудован ЭДС Link; анализы выполнены при диаметре пучка 1 мкм, токе 15 нА,

ускоряющем напряжении 20 Кв и времени набора спектра 120 с. Использован MINM-25-53 стандарт (ASTIMEX Scientific Limited, аншлиф № 01-044). СЭМ Tescan Vega 3 оборудован ЭДС Oxford Instruments X-act; анализы проведены при диаметре пучка 3 мкм, токе 20 нА, ускоряющем напряжении 20 кВ для сульфидов и 30 кВ для золота и МПГ, времени набора спектра 120 с («мёртвое» время набора 10–15 отн. %); использованный стандарт № 1362 (Microanalysis Consultants Ltd.). Предел обнаружения составляет ~ 0.2 мас. % благодаря аналитическому режиму и длительному «живому» времени (Лаврентьев и др., 2015).

Минералы элементов платиновой группы

В Миасской россыпной зоне среди 18 россыпей, по которым имеются сведения о составе минералов, 11 россыпей содержат МПГ. Среди них изучены МПГ из Киалимской и Малоиремельской россыпей (табл. 1).

Таблица 1

Минералы ЭПГ в Киалимской и Малоиремельской россыпях

Table 1

PGE minerals from Kialim and Maly Iremel placers

Минералы	Формула (www.mindat.org)	Россыпи	
		Киалимская	Малоиремельская
Рутений	(Ru,Ir)	+++	+++
Осмий	(Os,Ir,Ru)	++	++
Иридий	(Ir,Os,Ru)	++	++
Изоферроплатина	Pt ₃ Fe	++	++
Железистая платина	(Pt,Fe)	++	+
Лаурит	RuS ₂	++	++
Эрликманит	OsS ₂	++	
Толовкит?	IrSbS	+	
Родарсенит	(Rh,Pd) ₂ As		+
Рутенарсенит	(Ru,Ni)As		+
Ирарсит	(Ir,Ru,Rh,Pt)AsS		+
Иридарсенит	(Ir,Ru)As ₂		+
Миассит?	Rh ₁₇ S ₁₅		+
Боуит	(Rh,Ir,Pt) ₂ S ₃		+
Купродосит	(Cu,Fe)Rh ₂ S ₄		+
Куперит	PtS		+
Туламинит?	Pt ₂ CuFe		+
Ксингцхонгит?	(Pb,Cu,Fe)(Ir,Pt,Rh) ₂ S ₄		+
Хонгшиит?	PtCu		+
Минерал, близкий по составу к RhSbS	RhSbS	+	
Минерал, близкий по составу к PtS ₂	PtS ₂		+
Минерал, близкий по составу к Pd ₃ Sb	Pd ₃ Sb		+
Неназванные сульфиды ЭПГ	(Ir,Rh,Ni)S (Ir,Os) ₃ S ₂	+	

Примечание. Минералы: +++ – главные, ++ – второстепенные, + – редкие.

Note. Minerals: +++ – major, ++ – secondary in abundance, + – rare.

В россыпях установлены минералы системы Os–Ir–Ru и Pt–Fe, а также сульфиды, арсениды, сульфидарсениды и антимониды ЭПГ (см. табл. 1). Минералы в большинстве случаев представлены зёрнами различной степени окатанности размером 1–2 мм. Среди них выделяются пластинчатые индивиды со спайностью, изометричные кристаллы и сростки агрегатов. На основании содержания главных элементов, минералы системы Os–Ir–Ru подразделены на три группы: рутений, осмий и иридий (Harris, Cabri, 1991). На треугольной диаграмме (рис. 2а, б) состав минералов системы Os–Ir–Ru из обеих россыпей без видимых микровключений сульфидов и арсенидов ЭПГ образует рутениевый тренд, тогда как таковые с включениями из Малоиремельской россыпи обеднены иридием, и их состав образует осмий-рутениевый тренд (см. рис. 2в, г).

Киалимская россыпь. В минеральном составе 24 зёрен из тяжёлого концентрата преобладает рутений (59 %) при подчинённом количестве осмия (25 %), иридия и сростков МПГ (по 8 %) (рис. 3а).

Первая (наиболее распространённая) группа, которая слагает верхнюю часть рутениевого тренда, представлена зёрнами рутения размером до 2 мм. Зёрна содержат микровключения кристаллов Pt–Fe сплавов гексагональной формы (отрицательные кристаллы) размером 15–40 мкм и лаурита, морфология которых обусловлена структурой матрицы. Зёрна K2-A и K2-1 рутения характеризуются присутствием микровключений изоферроплатины с пониженными содержаниями Pt и существенным количеством Rh, Ni и Cu (табл. 2). В зерне K2-6 обнаружены включения Os–Ir–As-содержащего лаурита (см. табл. 2), который также заполняет трещины размером до 30 мкм по спайности и реже формирует кристаллы размером 20 × 40 мкм в ассоциации с медьсодержащим золотом (Au 93–95; Ag 2–6; Cu 2–4 мас. %) и минералом, близким по составу к толовкиту (рис. 4а). Несмотря на хорошую сумму анализов, в минерале выявлен дефицит металлов и сурьмы и избыток серы. Толовкит(?) содержит значительное количество Rh (2.31–3.17 мас. %) и Pt

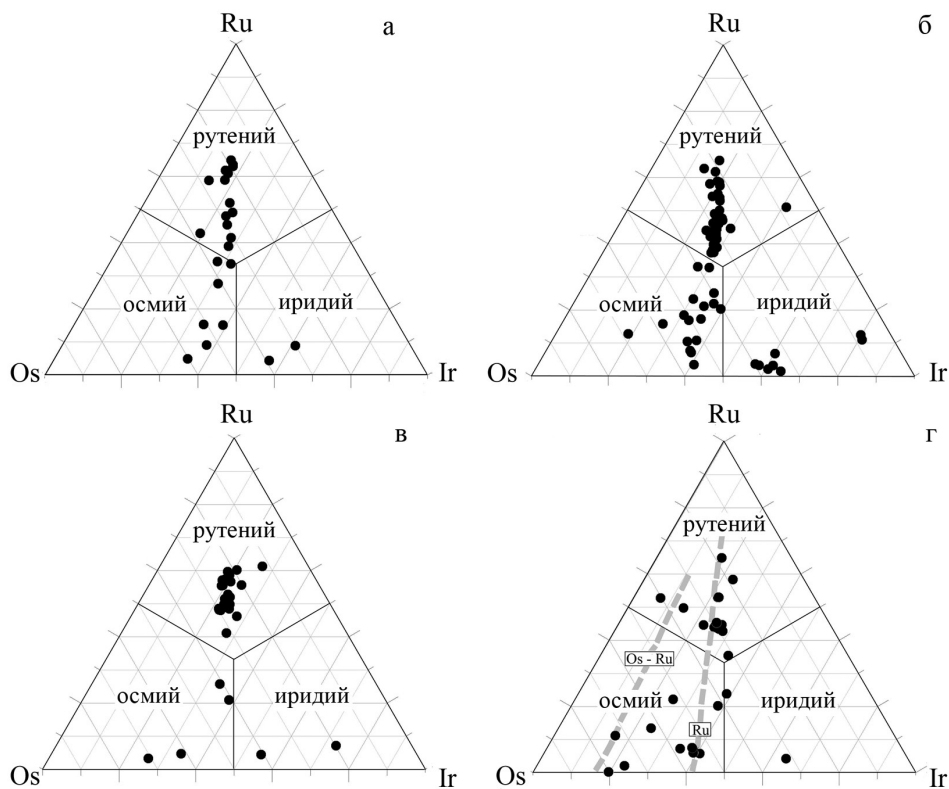


Рис. 2. Соотношение Os, Ir и Ru в МПГ из Киалимской (а) и Малоиремельской (б-г) россыпей.

а, б – минералы ЭПГ без включений; в – минералы ЭПГ в сростании с изоферроплатиной; г – минералы ЭПГ в сростании с сульфидами и сульфоарсенидами ЭПГ. Ru и Os-Ru – рутениевый и осмий-рутениевый тренды, соответственно.

Fig. 2. Atomic ratio of Os, Ir and Ru in PGMs of the Kialim (a) and Maly Iremel placers (б-г).

а, б – inclusion-free PGMs; в – PGMs intergrown with isoferroplatinum; г – PGMs intergrown with PGE sulfides and sulfarsenides. Ru and Os-Ru – ruthenium and osmium-ruthenium trends, respectively.

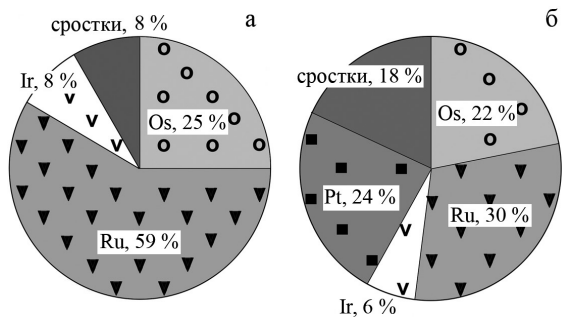


Рис. 3. Минеральный состав изученных проб из Киалимской (а) и Малоиремельской (б) россыпей.

Fig. 3. PGM ratio of the studied samples from Kialim (a) and Maly Iremel (б) placers.

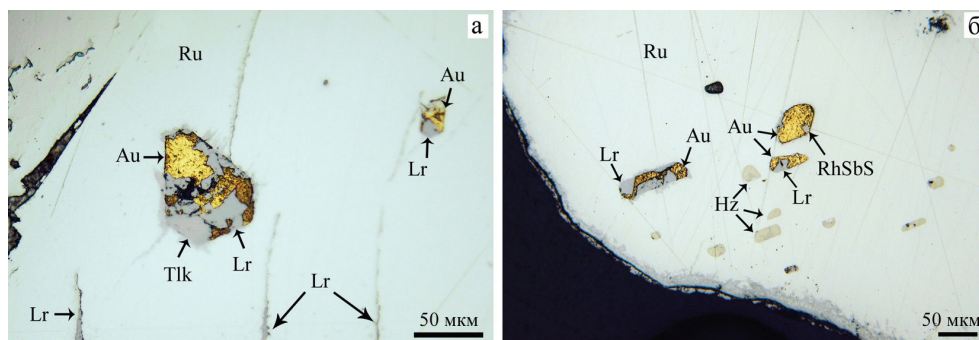


Рис. 4. Зёрна рутения К-5-2 (а) и К2-С-1 (б) из Киалимской россыпи с включениями хизлевудита (Hz), лаурита (Lr), золота (Au), минерала, близкого по составу к толовкиту (Тлк), и неизвестного минерала RhSbS. Отражённый свет.

Fig. 4. Ruthenium grains К-5-2 (а) and К2-С-1 (б) from Kialim placer with inclusions of heazlewoodite (Hz), laurite (Lr), gold (Au), a mineral similar in composition to tolovkite (Tlk), and unnamed mineral RhSbS. Reflected light.

Таблица 2

Table 2

Средний химический состав (мас. %) минералов ЭПГ из Киалимской и Малоиремельской россыпей

Average chemical composition (wt. %) of PGMs from the Kialim and Maly Iremel placers

Зерно	n	Киалимская россыпь										Минерал или формула	Формула			
		Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Cu	Fe	Ni	Sb			As	S	Сумма
K2-A	3	34.9	28.7	31.1	2.4	2.4	—	н.п.	0.4	н.п.	—	—	—	99.9	Рутений	$(Ru_{0.46}Os_{0.27}Ir_{0.22}Rh_{0.03}Pt_{0.02})_{\Sigma 1.00}$
	5	—	—	—	3.7	85.7	—	1.4	7.7	1.1	—	—	—	99.6	Изоферроплагина	$(Pt_{2.66}Rh_{0.24})_{\Sigma 2.90}(Fe_{0.85}Ni_{0.12}Cu_{0.06})_{\Sigma 1.09}$
K2-1	4	24.0	20.9	43.8	4.5	6.6	—	н.п.	н.п.	н.п.	—	—	—	99.8	Рутений	$(Ru_{0.58}Os_{0.17}Ir_{0.15}Rh_{0.06}Pt_{0.04})_{\Sigma 1.00}$
	4	—	—	—	6.2	83.5	—	0.5	8.0	1.7	—	—	—	99.9	Изоферроплагина	$(Pt_{2.57}Rh_{0.36})_{\Sigma 2.93}(Fe_{0.84}Ni_{0.20}Cu_{0.06})_{\Sigma 1.10}$
K2-6 ^{Au}	6	32.1	30.3	32.0	1.5	4.0	—	—	—	—	—	—	—	99.9	Рутений	$(Ru_{0.47}Os_{0.25}Ir_{0.23}Rh_{0.02}Pt_{0.03})_{\Sigma 1.00}$
	1	16.8	15.4	36.4	—	—	—	—	—	—	0.9	30.3	—	99.8	Лаурит	$(Ru_{0.75}Os_{0.18}Ir_{0.17}Pt_{0.03}S_{0.03})_{\Sigma 2.00}$
K2-C-1 ^{Au, Ni, S₂}	3	—	—	—	2.3	3.0	—	—	—	—	33.9	—	—	99.8	Толовкит?	$(Ir_{0.59}Rh_{0.05}Pt_{0.04}Ru_{0.01})_{\Sigma 0.69}Sb_{0.67}S_{1.00}$
	4	30.9	24.3	41.0	2.3	1.3	—	—	—	—	—	—	—	99.8	Рутений	$(Ru_{0.56}Os_{0.23}Ir_{0.17}Rh_{0.03}Pt_{0.01})_{\Sigma 1.00}$
K2-C-2	2	—	—	—	7.6	72.8	—	3.4	10.1	6.2	—	—	—	100.1	Железистая платина	$(Pt_{0.47}Fe_{0.24}Ni_{0.13}Rh_{0.09}Cu_{0.07})_{\Sigma 1.00}$
	6	—	—	—	1.9	—	—	—	—	—	—	36.5	—	99.6	Лаурит	$(Ru_{0.84}Ir_{0.12}Rh_{0.03}S_{0.99})_{\Sigma 2.00}$
K2-4-2-1	1	—	—	—	20.8	—	—	—	—	—	40.7	—	—	99.9 ¹	RhSbS	$(Rh_{0.49}Ir_{0.27}Au_{0.05}Sb_{0.80}S_{1.00})_{\Sigma 2.50}$
	5	48.7	41.8	8.5	0.5	—	—	—	0.4	н.п.	—	—	—	99.9	Осмий	$(Os_{0.45}Ir_{0.38}Ru_{0.15}Rh_{0.01}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.00}$
K2-3-2	3	29.1	29.7	4.8	—	—	—	—	0.2	0.5	—	10.0	25.8	100.1	Эрликманит	$(Os_{0.32}Ir_{0.32}Ru_{0.11}Ni_{0.02}S_{0.77})_{\Sigma 1.72}As_{0.28}S_{2.00}$
	3	55.0	39.5	5.0	—	—	—	—	0.3	н.п.	—	—	—	99.7	Осмий	$(Os_{0.53}Ir_{0.37}Ru_{0.09}Fe_{0.01})_{\Sigma 1.00}$
K2-3-2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.8	Лаурит	$(Ru_{0.80}Ir_{0.11}S_{0.91}S_{2.00})_{\Sigma 3.86}$
	4	26.3	60.5	5.2	1.3	5.6	—	—	0.8	0.3	—	—	—	100.0	Иридий	$(Ir_{0.55}Os_{0.25}Ru_{0.09}Pt_{0.05}Fe_{0.03}Rh_{0.02}Ni_{0.01})_{\Sigma 1.00}$
K2-3-2	1	26.1	41.7	16.5	—	—	—	—	1.2	0.5	н.п.	14.0	—	100.0	UM1974-12-S-IrNiRh	$(Ir_{0.50}Ru_{0.36}Os_{0.32}Fe_{0.05}Ni_{0.02})_{\Sigma 1.25}S_{1.00}$
	1	29.3	41.3	13.1	—	—	—	—	1.4	0.6	—	2.4	11.8	99.9	UM1974-12-S-IrNiRh	$(Ir_{0.55}Os_{0.38}Ru_{0.33}Fe_{0.08}Ni_{0.02})_{\Sigma 1.36}(S_{0.92}As_{0.08}S_{1.00})_{\Sigma 2.00}$
K2-3-2	2	30.5	49.0	5.9	—	—	—	—	1.4	0.6	—	5.3	7.2	99.9	Ir-Os сульфид	$(Ir_{0.74}Os_{1.09}Ru_{0.65}Fe_{0.18}Ni_{0.07})_{\Sigma 3.47}(S_{1.52}As_{0.48}S_{2.00})_{\Sigma 4.00}$
	1	—	—	—	4.6	85.1	—	—	8.9	0.8	—	—	—	99.4	Изоферроплагина	$(Pt_{2.71}Rh_{0.25}S_{2.26})(Fe_{0.98}Ni_{0.06})_{\Sigma 1.04}$
Ир1-5-4	1	—	—	48.8	6.9	—	—	—	—	—	4.5	39.9	—	100.1	Лаурит	$(Ru_{0.74}Rh_{0.10}S_{0.84})(S_{1.91}As_{0.09}S_{2.00})_{\Sigma 2.00}$
	13	—	—	—	54.4	6.2	12.3	—	0.7	0.4	1.5	24.3	—	99.7	Родарсенит	$(Rh_{1.57}Pd_{0.34}Pt_{0.09}Fe_{0.04}Ni_{0.02}S_{2.06})(As_{0.96}Sb_{0.04})_{\Sigma 1.00}$
Ир3-срБ-1	5	—	—	—	1.7	91.3	—	—	6.8	0.2	—	—	—	100.0	Железистая платина	$(Pt_{0.77}Fe_{0.20}Rh_{0.03}S_{1.00})_{\Sigma 1.00}$
	2	—	—	1.0	64.8	—	8.7	0.7	1.0	2.1	—	—	23.2	101.5	Миассит?	$(Rh_{13.06}Pd_{1.41}Cu_{0.23}Fe_{0.36}Ni_{0.75})_{\Sigma 16.01}S_{15.00}$
Ир3-срА-3	1	—	—	3.0	61.4	—	2.1	—	н.п.	0.3	—	—	32.5	99.3	Боуит	$(Rh_{1.70}Ru_{0.27}Fe_{0.02}S_{1.99}S_{3.00})_{\Sigma 3.00}$
	4	—	—	—	45.5	—	—	17.7	0.4	0.4	—	—	36.0	100.0	Купородсит	$(Cu_{0.99}Fe_{0.03}Ni_{0.02}S_{1.04}Rh_{1.57}S_{4.00})_{\Sigma 7.50}$
Ир3-срА-3	4	—	—	—	—	76.8	—	—	—	—	—	—	22.6	99.4	PtS ₂	$(Pt_{1.11}S_{2.00})_{\Sigma 3.11}$
	1	—	—	—	10.2	—	59.0	—	2.0	—	25.8	—	—	97.0 ²	Pd ₃ Sb	$(Pd_{2.41}Rh_{0.43}Fe_{0.17}S_{3.01})(Sb_{0.91}Te_{0.09})_{\Sigma 1.00}$
Ир3-срА-3	1	29.0	25.6	32.3	4.3	8.1	—	—	0.7	—	—	—	—	100.0	Рутений	$(Ru_{0.45}Os_{0.22}Ir_{0.19}Rh_{0.06}Pt_{0.06}Fe_{0.02})_{\Sigma 1.00}$
	3	—	—	—	2.4	88.4	—	—	8.4	0.5	—	—	—	99.7	Изоферроплагина	$(Pt_{2.86}Rh_{0.13})_{\Sigma 2.99}(Fe_{0.95}Ni_{0.06})_{\Sigma 1.01}$

Окончание таблицы 2

Зерно	n	Сумма											Минерал или формула	Формула				
		Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Cu	Fe	Ni	Sb	As			S			
Ир3- срА-7	1	37.0	32.7	25.8	1.5	1.9	—	—	0.4	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.39} Os _{0.30} Ir _{0.26} Rh _{0.02} Pt _{0.02} Fe _{0.01})Σ1.00	
	6	—	—	—	1.6	88.5	—	—	8.7	0.7	—	—	—	—	—	—	(Pt _{2.86} Rh _{0.06})Σ2.92(Fe _{1.01} Ni _{0.06})Σ1.07	
Ир2-3-5	3	27.3	33.1	34.0	3.5	1.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.48} Ir _{0.25} Os _{0.21} Rh _{0.05} Pt _{0.01})Σ1.00	
	4	—	—	59.0	2.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.99} Rh _{0.04})Σ1.03S _{2.00}	
Ир2-3-7	3	32.6	24.8	39.5	2.2	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.55} Os _{0.24} Ir _{0.18} Rh _{0.03})Σ1.00	
	3	—	—	47.7	4.7	—	—	—	—	2.9	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.81} Ni _{0.08} Rh _{0.08})Σ0.97As _{1.00}	
Ир49- срБ-5	3	—	—	48.7	5.2	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ir _{0.61} Ru _{0.12} Pt _{0.07} Rh _{0.02})Σ0.81As _{0.72} S _{1.28}	
	3	44.6	39.5	13.6	1.2	0.3	—	—	0.6	н.п.	—	—	—	—	—	—	(Os _{0.39} Ir _{0.34} Ru _{0.23} Rh _{0.02} Fe _{0.02})Σ1.00	
Ир49- ср3-26	1	—	—	9.6	—	1.1	—	—	9.1	2.4	—	—	—	—	—	—	(Pt _{0.60} Fe _{0.25} Ni _{0.06} Ir _{0.06} Rh _{0.03})Σ1.00	
	3	38.4	52.3	2.2	0.2	6.8	—	—	н.п.	—	—	—	—	—	—	—	(Ir _{0.52} Os _{0.38} Pt _{0.07} Ru _{0.04})Σ1.00	
				0.5	н.п.	77.4	—	—	20.3	—	—	—	—	—	—	—	(Pt _{1.10} Rh _{0.03})Σ1.13Cu _{0.88}	
Малоиремельская россыпь, сростки																		
Ир49- ср-2	3	33.8	27.1	30.8	3.2	4.7	—	—	н.п.	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.45} Os _{0.25} Ir _{0.21} Rh _{0.05} Pt _{0.03})Σ1.00	
	4	—	—	н.п.	4.5	85.8	—	—	8.6	0.9	—	—	—	—	—	—	—	(Pt _{2.71} Rh _{0.25})Σ2.96(Fe _{0.92} Ni _{0.12})Σ1.04
Ир2-4- 5 ^{Au}	2	—	—	0.4	0.2	77.5	—	—	8.5	2.2	1.1	—	—	—	—	—	—	Pt _{2.00} (Fe _{0.60} Ni _{0.20})Σ0.80(Cu _{0.72} Sn _{0.15} Sb _{0.05})Σ0.92
	5	36.1	25.7	30.4	3.7	3.1	—	—	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ru _{0.45} Os _{0.28} Ir _{0.19} Rh _{0.05} Pt _{0.02} Fe _{0.01})Σ1.00
	6	—	—	20.5	0.4	12.4	—	—	4.0	н.п.	—	—	—	—	—	—	—	(Pb _{0.25} Cu _{0.25})Σ0.50(Rh _{0.50} Ir _{0.45} Pt _{0.42})Σ1.37S _{4.00}
Ир2-4-2	1	—	—	—	—	84.3	—	—	—	0.9	—	—	—	—	—	—	—	(Pt _{0.90} Ni _{0.03})Σ0.93S _{1.00}
	3	50.9	39.5	8.2	0.3	—	—	—	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	(Os _{0.48} Ir _{0.36} Ru _{0.14} Fe _{0.01})Σ1.00
	12	—	—	56.4	3.1	0.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ir _{0.73} Ru _{0.08})Σ0.81As _{0.73} S _{1.27}
	3	1.0	54.5	1.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(Ir _{0.97} Ru _{0.03} Os _{0.03})Σ1.03(As _{1.93} S _{0.07})Σ2.00

Примечание. n – количество анализов; прочерк – не обнаружено; н.п. – ниже предела обнаружения. Полукожирным выделены минералы, содержащие включения. Минералы содержат: ^{Au} – включения золота, ^{Ni}, ^S, ^{3, 2} – включения хизлеудита; ¹ – 4.2 мас. % Au; ² – 3.1 мас. % Te; ³ – 11.6 мас. % Pb и 1.0 мас. % Cd; ⁴ – 3.4 мас. % Sn. Формулы минералов рассчитаны на сумму металлов, равную 1 (рутенит, осмий, иридий, железистая платина), 2 (хонгшит) и 4 (изоферроплатина, туламинит); сумму анионов, равную 2 (лаурит, эриксманит, ирарсит, иридарсенит, unnamed Ir sulfide), один (толовкит, RhSbS, unnamed Ir sulfide), два (PtS₂), три (боуит), четыре (купородент, кейнгохонгит) и 15 (миассит) атомов серы; один атом мышьяка (родарсенит, рутенарсенит); один атом сурьмы (Pd₃Sb).

Note. n – number of analyses; dash, not detected; н.п. – below detection limit. Host minerals with inclusions are typed in bold. Minerals contain: ^{Au} – inclusions of gold; ^{Ni}, ^S, ^{3, 2} – inclusions of heazlewoodite; ¹ – 4.24 wt. % Au; ² – 3.11 wt. % Te; ³ – 11.6 wt. % Pb and 1.01 wt. % Cd; ⁴ – 3.38 wt. % Sn. The formulas of minerals are recalculated to: metal sum of 1 (ruthenium, osmium, iridium, ferroplatinum), 2 (hongshiite) and 4 (isoferroplatinum, tulameenite); anion sum of 2 (laurite, erlichmanite, irarsite, iridarsenite, unnamed Ir-Os sulfide); one (tolovkite, RhSbS, unnamed Ir sulfide); one (tolovkite, cooperite), two (PtS₂), three (boweite), four (cuprorhodite, xingzhongite) and 15 (miassite) sulfur atoms; one arsenic (rhoarsenite, rutenarsenite), one antimony (Pd₃Sb).

(2.49–3.00 мас. %) и незначительные концентрации Ru (0.86 мас. %) и Cu (0.12 мас. %) (см. табл. 2). Зерно рутения K2-C-1 содержит микровключения железистой платины и Ir-Rh-содержащего лаурита (см. табл. 2), в ассоциации с золотом и хизлевудитом. Одно микровключение золота содержит зерно (реликтовое?) сульфогидроксида иридия и родия (см. рис. 4б, табл. 2), сходного по составу с толовкитом и характеризующегося дефицитом металлов и сурьмы при избытке серы. По преобладанию Rh над Ir, его состав близок неназванной фазе RhSbS, найденной в россыпях округа Туламин, Британская Колумбия (Raicevic, Cabri, 1976; Nixon et al., 1990), которая, возможно, является аналогом толовкита IrSbS. Минерал сходного состава был также описан в офиолитах Шетландских островов (Tarkian, Prichard, 1987), дунитах трубок Моихук и Онвервач в Бушвельдском комплексе (Rudashevsky et al., 1992) и в Pt-Fe самородках ручья Джубдо в Эфиопии (Cabri et al., 1981).

Вторая группа включает обломки гомогенных кристаллов и окатанные зёрна иридиево-рутениевого осмия размером 100–300 мкм с включениями сульфидов Os (эрликманита, зерно K2-C-2) и Ru (лаурита, зерно K-2-4-2-1). Эрликманит содержит повышенные количества Ir, Ru и As и характеризуется недостатком металлов (см. табл. 2).

Третья группа представлена зёрнами иридия, который содержит включения хизлевудита и нестехиометричных сульфидов ЭПГ, по соотношению металл/сера сходных с неназванными минералами (Ir,Rh,Ni)S и (Ir,Os)₃S₂ (UM1974-12-S:IrNiRh and Ir-Os Sulphide II, соответственно, www.mindat.org) (см. табл. 2).

Некоторые МПГ встречаются в виде сростков, например, зерно K-2-4-1 представляет собой сросток иридия и осмия. Осмий содержит включения лаурита размером 10 × 30 мкм. На контакте осмия и иридия наблюдается агрегат, состоящий из двух зёрен: хизлевудита и Ir-содержащего сульфида Ni размером 50 × 60 мкм. Помимо главных элементов (Ni 19.98 и Ir 31.00 мас. %), минерал также содержит Ru 5.81, Rh 2.87, Cu 2.20 и Fe 2.93 мас. % и по содержанию серы (среднее 35 мас. %) и отношению металл/сера близок к ЭПГ-содержащему вазситу (Ni_{0.62}Ir_{0.29}Ru_{0.11}Fe_{0.09}Cu_{0.06}Rh_{0.06})_{Σ1.23}S_{Σ2.00}.

Малоиремельская россыпь. Из тяжёлого концентрата этой россыпи, собранного ОАО «Миасский прииск» во время эксплуатации россыпи с 1998 по 2004 гг., было изучено 119 зёрен МПГ. В минеральном составе этой пробы также преоб-

ладает рутений (30 %) с подчинённым количеством Pt-Fe сплавов (24 %) и осмия (22 %), небольшим количеством иридия (6 %); количество сростков МПГ составляет 18 % (см. рис. 3б).

Зерно изоферроплатины Ир1-5-4 характеризуется присутствием примесей Rh и Ni и содержит цепочку удлинённых кристаллов лаурита размером 5–20 мкм и хаотично размещённых изометричных и линзовидных микровключений родарсенита размером 3–10 мкм (см. табл. 2). Железистая платина содержит микровключения боуита, который образует дезинтегрированные агрегаты из удлинённых зёрен (местами с кристаллическими границами), которые заполняют трещины в железистой платине (зерно Ир49-срБ-1-1) или образуют сростки с лауритом (зерно Ир49-срБ-1) (рис. 5а). Боуит характеризуется высокими содержаниями Cu (17.52–23.54 мас. %) и низкими – Fe (0.42–0.58 мас. %), Ni (0.10–0.35 мас. %) и Pd (0.04–0.27 мас. %) (см. табл. 2). Лаурит содержит в составе Os, Rh и Fe (см. табл. 2).

Зерно железистой платины Ир49-срБ-1 также содержит многочисленные включения различных сульфидов и антимонидов ЭПГ, в том числе миассита(?), купрородсита и неназванного сульфида Pt и антимонида Pd. Минерал, близкий по составу к миасситу, образует мелкие (до 5 мкм) овальные и угловатые включения (см. рис. 5а), характеризуется высокими содержаниями Pd (7.21–8.73 мас. %) и низкими – Fe (0.98 мас. %), Ni (1.90–2.12 мас. %) и Cu (0.58–0.72 мас. %) и дефицитом металлов (см. табл. 2). Купрородсит встречается в виде агрегатов из удлинённых и угловатых зёрен в трещинах железистой платины (см. рис. 5б и табл. 2). Небольшие (5–20 мкм) изометричные или удлинённо-угловатые зёрна и агрегаты сульфида Pt встречаются в трещинах железистой платины (см. рис. 5а). Концентрации Pt и S в минерале варьируют от 74.35 до 78.15 мас. % и от 21.28 до 25.02 мас. %, соответственно. Состав минерала наилучшим образом рассчитывается на формулу PtS₂, в которой формульные коэффициенты платины варьируют от 0.97 до 1.21 ф.е. (в среднем, 1.11) (см. табл. 2). В сростке с миасситом(?) находится мелкое зерно неизвестного антимонида Pd размером около 3 мкм (см. рис. 5а), состав которого может быть рассчитан на формулу (Pd_{2.41}Rh_{0.43}Fe_{0.17})_{Σ3.01}(Sb_{0.91}Te_{0.09})_{Σ1.00}. По ассоциации с железосодержащей платиной, катионно-анионному соотношению 3:1 и присутствию Sb и Te, этот минерал является аналогом винцентита (Pd,Pt)₃(As,Sb,Te) (Stumpfl, Tarkian, 1974; Tarkian et al., 2002).

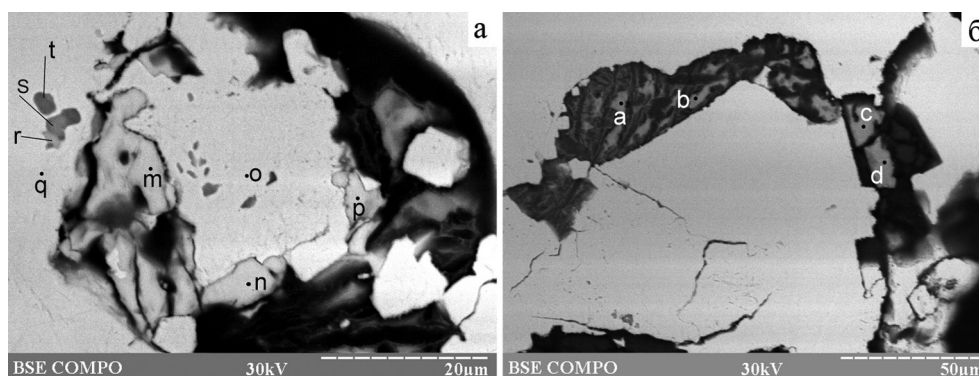


Рис. 5. Микровключения в железистой платине (точки *o*, *q*) из Малоиремельской россыпи.

a – боуит (точка *t*), минерал, близкий по составу к миасситу (точка *s*), незаванная фаза PtS_2 (точки *m*, *n*, *p*), антимонид Pd (точка *r*); *б* – купрородсит (точки *a–d*). Зерно Ир49-срБ-1. СЭМ-фото.

Fig. 5. Microinclusions in a fracture of ferroan platinum (points *o*, *q*) from Maly Iremel placer.

a – bowieite (point *t*), mineral similar in composition to miassite (point *s*), unnamed mineral PtS_2 (points *m*, *n*, *p*), and unnamed mineral Pd_3Sb (point *r*); *б* – cuprorhodsite (points *a–d*). Grain Ir49-srB-1. SEM images.

Два зерна рутения (Ир49-срА-3 и Ир49-срА-7) содержат микровключения кристаллов изоферроплатины шестиугольного сечения (отрицательные кристаллы). Особенно много микровключений сульфидов и арсенидов ЭПГ (20–30 % площади) содержится в зёрнах рутения Ир-2-3-5 и Ир-2-3-7 (рис. 6, см. табл. 2). В зерне Ир-2-3-5 выявлены волнообразно ориентированные овальные и пластинчатые зёрна лаурита размером 10–50 мкм (см. рис. 6а). В зерне Ир-2-3-7 наблюдаются хаотично расположенные овальные микровключения рутенарсенита до 30 мкм и ирарсита с кристаллическими очертаниями размером 5–70 мкм. Овальное зерно рутения (Ир49-2-24) до 0.1 мм в диаметре вмещает микровключения хизлевудита Ni_3S_2 до 20 мкм в срастании с сульфидом Ni (Ni 48.08, S 31.93 мас. %), содержащим Ru 11.32, Rh 2.21 и Fe 6.14 мас. %, формула которого $(Ni_{0.82}Fe_{0.11}Ru_{0.11}Rh_{0.02})_{\Sigma 1.06}S_{1.00}$ близка к формуле миллерита.

Зерно осмия (Ир49-срБ-5) содержит микровключения изоферроплатины (рис. 7а, см. табл. 2). В иридии (Ир49-ср3-26) наблюдаются многочисленные тонкие пластинки осмия и приуроченные к ним мелкие (3–8 мкм) кристаллы минерала, характеризующегося избытком металлов и близкого по составу к хонгшииту (см. рис. 7б, см. табл. 2).

Среди минералов ЭПГ Малоиремельской россыпи установлены срастания трёх типов (микрорагенезисов).

1) Сrostки пластинчатых кристаллов рутения размером 5–10 мкм с изоферроплатиной и минералом, близким по составу к туламиниту (рис. 8а, б, зёрна Ир49-ср2-1, -8, -16, -18) (см. табл. 2).

2) Решётчатые сrostки пластинчатых кристаллов рутения размером 7–15 мкм с интерстициальными агрегатами, сложенными золотом, изоферроплатиной, лауритом, а также мирмекитоподобными агрегатами сульфидов ЭПГ размером 5–30 мкм (см. рис. 8в, г, зерно Ир2-4-5). По химическому составу большинство сульфидов ЭПГ близки ксингцхонгиту (Fleischer et al., 1976) и характеризуются избытком S, Rh, Pt и Ir и недостатком Pb и Cu (см. табл. 2). Среди сульфидов ЭПГ встречаются редкие удлиённые зёрна куперита размером 5×20 мкм.

3) Сrostки осмия с хромитом, ирарситом и иридарсенитом; два последних минерала развиваются по трещинам спайности осмия (рис. 9, зерно Ир2-4-2).

В россыпи также были найдены специфические агрегаты золота и МПГ (в частности, изоферроплатины) в непосредственной близости друг от друга, которые «сцементированы» вторичным золотом (рис. 10а, б) и по текстуре напоминают песчаники. Некоторые зёрна осмиевого рутения окружены прерывистой каймой из медьсодержащего (3–4 мас. % Cu) золота с пробностью 829–853 ‰ (см. рис. 10в, г). На контакте с золотом осмиевый рутений преобразуется в иридиевый рутений, в котором содержания Os уменьшаются до 1–7 мас. %.

Обсуждение результатов

Особенности морфологии россыпных минералов ЭПГ. Морфология и взаимоотношения между МПГ изученных россыпей Южного Урала

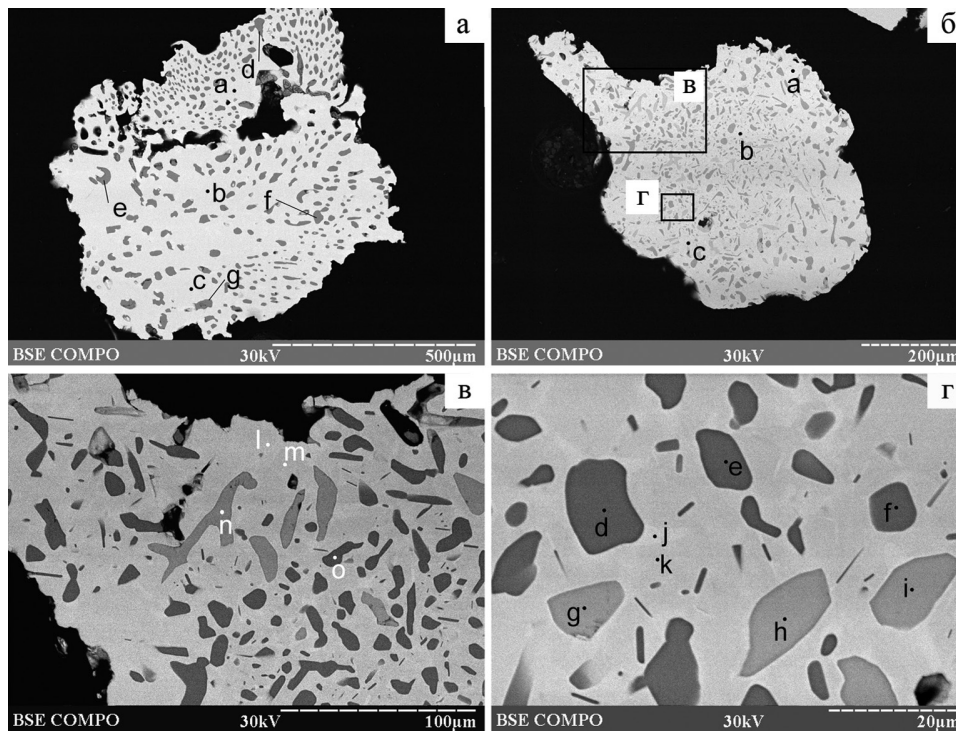


Рис. 6. Зёрна рутения с синхронными микровключениями сульфоарсенидов и арсенидов.

а – рутений (точки *a-c*) с лауритом (точки *d, e, f, g*), зерно Ир-2-3-5; б – рутений (точки *a-c*), зерно Ир-2-3-7; в-г – детали снимка бб: рутений (точки *l, m*) с осмием (точка *j*), рутенарсенидом (точки *o, d, e, f*) и ирарситом (точки *n, g, h, i*). СЭМ-фото.

Fig. 6. Ruthenium grains with synchronous microinclusions of sulfarsenides and arsenides.

а – ruthenium (points *a-c*) with laurite (points *d, e, f, g*), grain Ir-2-3-5; б – ruthenium (points *a-c*), grain Ir-2-3-7; в-г – details of Fig. 6б: ruthenium (points *l, m*) with osmium (point *j*), ruthenarsenite (points *o, d, e, f*) and irarsite (points *n, g, h, i*). SEM images.

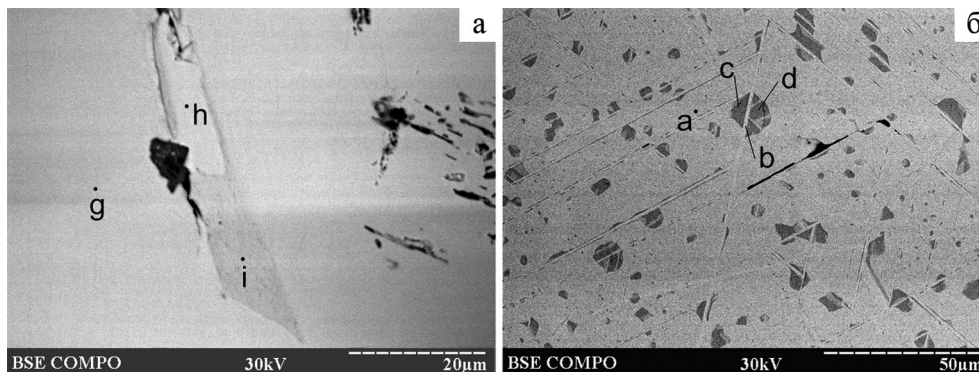


Рис. 7. Включения минералов в осмии и иридии.

а – угловатое включение железистой платины (точка *i*) в осмии (точки *g, h*), зерно Ир49-срБ-5; б – кристаллы хонгшиита(?) (точки *c, d*) и тонкие пластинчатые включения осмия (точка *b*) в иридии (точка *a*), зерно Ир-49-ср3-26. СЭМ-фото.

Fig. 7. Inclusions of minerals in osmium and iridium.

а – angular inclusion of ferroan platinum (point *i*) in osmium (points *g, h*), grain Ir49-srB-5; б – hongshiite (?) crystals (points *c, d*) and fine lamellas of osmium (point *b*) in iridium (point *a*), grain Ir49-sr3-26. SEM images.

отражают первичные тренды кристаллизации, которые, в целом, сходны с таковыми, установленными в коренных месторождениях платиноидов: иридий и осмий – рутений – платина – лаурит +

эрликманит – сульфоарсениды + сульфиды цветных металлов (Bird, Basset, 1980; Garutti, Zaccarini, 1997; Tolstykh et al., 2000). Например, решётчатые агрегаты эвгедральных и субгедральных кристал-

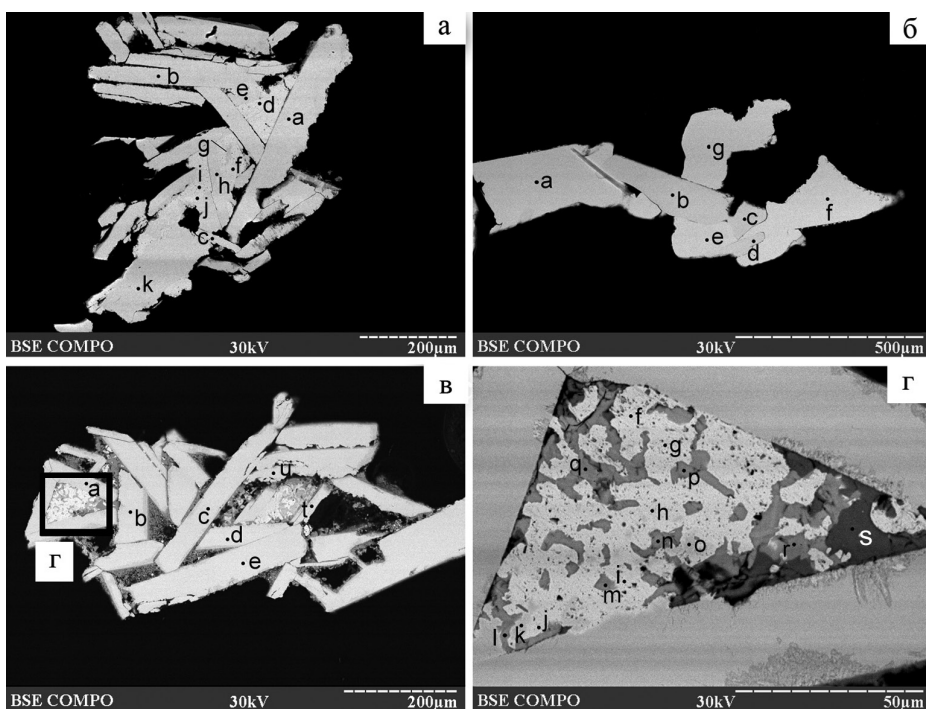


Рис. 8. Сротки минералов ЭПГ из Малоиремельской россыпи.

а – пластинчатые кристаллы рутения (точки *a, b, c, e, g, h, k*) с интерстициальной изоферроплатиной (точки *d, f, i*), зерно Ир49-ср2-1; б – агрегат кристаллов рутения (точки *b, c, d*) и изоферроплатины (точки *a, e, f, g*), зерно Ир49-ср2-16; в-г – агрегаты пластинчатых кристаллов рутения (точки *a, b, c, d, e, u*) с интерстициальными сротками ксингцхонгита(?) (точки *l, m, n, p, q, r*), золота (точки *f, h, i, j*) и лаурита (точка *s*). СЭМ-фото.

Fig. 8. Intergrowths of PGMs from the Maly Iremel placer.

а – platy ruthenium crystals (points *a, b, c, e, g, h, k*) with interstitial isoferroplatinum (points *d, f, i*), grain Ir49-sr2-1; б – aggregate of ruthenium (points *b, c, d*) and isoferroplatinum (points *a, e, f, g*) crystals, grain Ir49-sr2-16; в-г – aggregate of platy ruthenium crystals (points *a, b, c, d, e, u*) with interstitial intergrowths of xingzhongite(?) (points *l, m, n, p, q, r*), gold (points *f, h, i, j*) and laurite (point *s*). SEM images. SEM images.

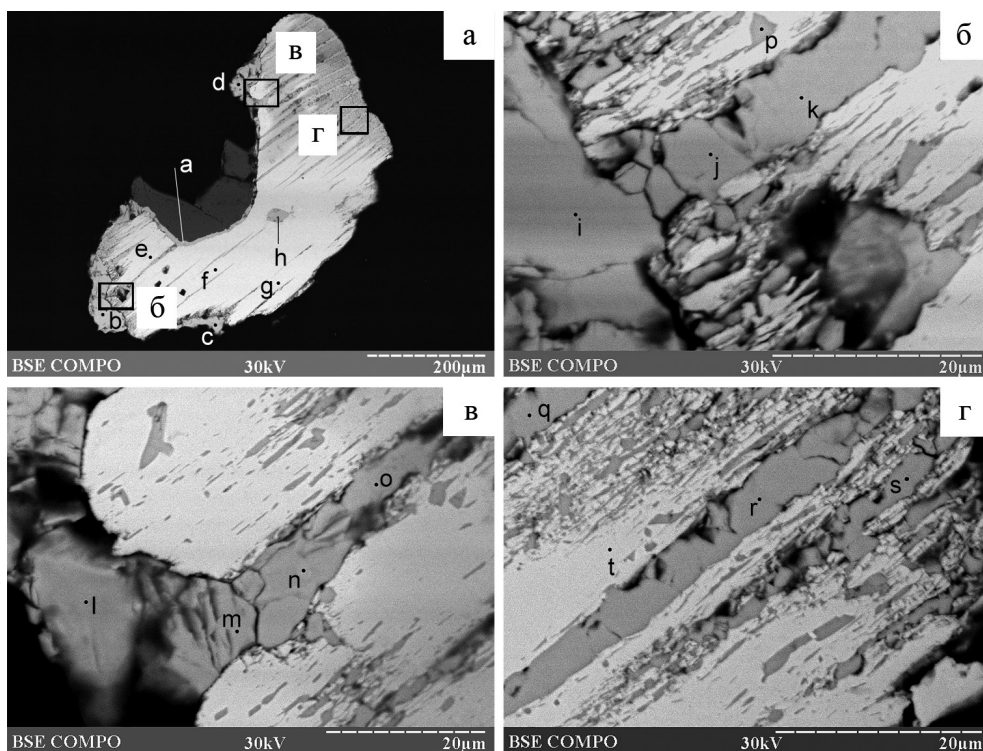


Рис. 9. Зерно осмия Ир2-4-2 (точки *e, f, g, t*), в срастании с хромитом (тёмно-серое слева), ирарситом (точки *a-d, h-k, l-o*) и иридарсенитом (точки *q, r, s*). СЭМ-фото.

Fig. 9. Osmium grain Ir2-4-2 (points *e, f, g, t*), which is developed around the chromite grains (dark gray from the left) and intergrown with irarsite (points *a-d, h-k, l-o*) and iridarsenite (points *q, r, s*). SEM images.

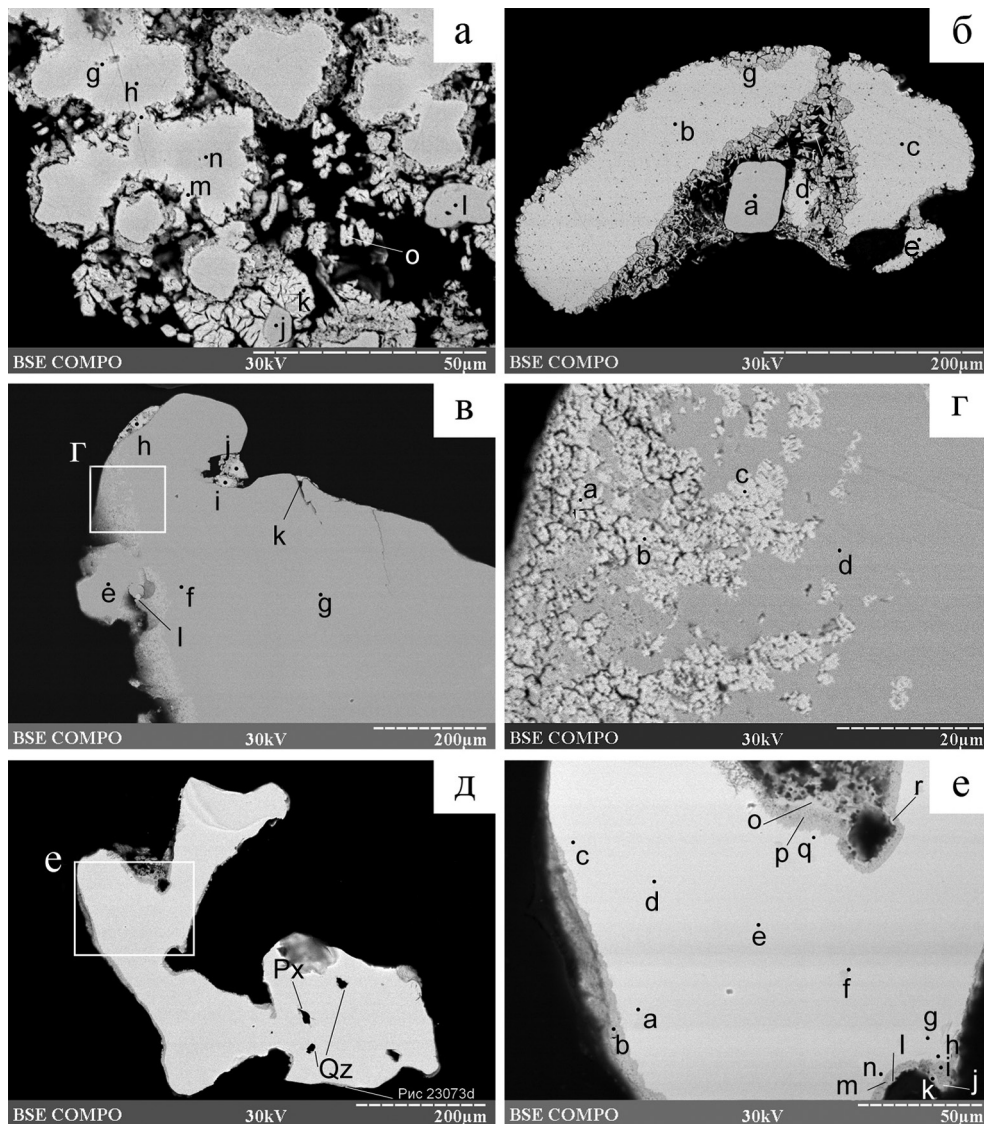


Рис. 10. Сrostки минералов ЭПГ из Малоиремельской россыпи.

а–б – золото–платиновые «песчаники» с обломками первичного медистого золота (точки *g, h, n, m* на рис. (а) и точки *b, c, d, e* на рис. (б)) и изоферроплатины (точки *i, j* на рис. (а) и точка *a* на рис. (б)) во вторичном золоте (точки *k, o* на рис. (а)), зерно Ир-3-5-2; в–г – рутений (точки *g, d*), окружённый золотом (точки *h, i, j*) и иридием (точки *a, b, c*), зерно Ир1-5-1; д–е – рутений иридиевый (точка *a, c-h, q* на рис. (е)) с гипергенной каймой рутения иридиевого (точка *b, i, m, p*), зерно Ир3-ср14-1. СЭМ-фото.

Fig. 10. PGM intergrowths from the Maly Iremel placer.

а–б – gold–platinum «sandstones» with clasts of primary cupriferous gold (points *g, h, n, m* in fig. a and points *b, c, d, e* in fig. б) and isoferroplatinum (points *i, j* in fig. a and point *a* in fig. б) in secondary gold (points *k, o* in fig. a), grain Ir-3-5-2; в–г – ruthenium (points *g, d*) rimmed by gold (points *h, i, j*) and iridium (points *a, b, c*), grain Ir1-5-1; д–е – Ir ruthenium (points *a, c-h, q*) with supergene Ir ruthenium rim (points *b, i, m, p*), grain Ir3-sr14-1. SEM images.

лов рутения с интерстициальной железистой платиной из Малоиремельской россыпи указывают на то, что кристаллизация рутения происходила в первую очередь (см. рис. 8а). Эти агрегаты сходны с таковыми, обнаруженными в россыпях Орегона (США) (Bird, Bassett, 1980), Тибета (Китай) (Bai et al., 2000) и Камчатки (Россия) (Сидоров, 2009).

Образование сульфидов ЭПГ чаще следует за кристаллизацией минералов системы Os–Ir–Ru: например, лаурит местами развивается по трещинам спайности рутения (см. рис. 4). Эти агрегаты сформировались после раскрытия трещин спайности под влиянием поздних стрессовых деформаций и сходны с таковыми, описанными в россыпях

Салаира и Восточных Саян (Толстых и др., 1999; Киселева и др., 2014). Распространено также замещение минералов системы Os–Ir–Ru сульфидами и сульфарсенидами ЭПГ: в Малоиремельской россыпи рутений зонально замещается лауритом и ирарситом (рис. 11, 12а, б, г), тогда как осмий замещается эрликманитом и лауритом (см. рис. 12д, е). В МПГ из россыпей Верхнейвинского массива на Среднем Урале каймы замещения имеют хорошо выраженную зональность: сульфоарсениды и арсениды Os–Ir–Ru в сочетании с осмием – смесь сульфоарсенидов и арсенидов – сульфиды, сульфоантимониды и новообразованные интерметаллиды (OsIr₂) – лаурит + эрликманит (Мурзин и др., 2015). Некоторые зёрна рутения из исследованных россыпей имеют прерывистую кайму толщиной 5–10 мкм, скорее всего, гипергенного происхождения из-за её необычного состава, где содержания Os уменьшаются до 2–10 мас. %, а содержания Ir и Ru возрастают 18–24 и 13–16 мас. %, соответственно. Вынос осмия был отмечен ранее для рутения в древних золотых изделиях (Зайков и др., 2015). В то же время, результаты наших исследований показывают и возможность сокристаллизации минералов системы Os–Ir–Ru и сульфидов и арсенидов ЭПГ; в частности, это относится к находкам тесно сросшихся агрегатов рутения с лауритом, ирарситом и рутенарсенидом из Малоиремельской россыпи, которые напоминают структуры распада (см. рис. 6), или ассоциации хонгшиита(?) с осмием (см. 7б).

Различные тренды составов минералов системы Os–Ir–Ru с включениями и без них (см. рис. 2) обладают сходством с таковыми, установленными для МПГ из хромититов, которые подверглись влиянию гранитных интрузий. Так, в Южном Тибете (Bai et al., 2000), минералы ЭПГ из хромититов,

расположенных вблизи батолита Гандезе, занимают левое поле на диаграмме. В работе В.В. Мурзина с соавторами (2015) выделен осмий-рутениевый тренд, характерный для МПГ россыпей р. Алабашка на Среднем Урале. Эти россыпи расположены в пределах Мурзинско-Адуйского гранитогнейсового комплекса. По нашему мнению, изменение первичных магматических составов указанных МПГ Южного Тибета и Среднего Урала, возможно, связано с влиянием этих гранитных интрузий. В нашем случае предполагается, что вариации состава первичных МПГ обусловлены воздействием поздних гидротермальных флюидов, при котором происходит вынос иридия из МПГ, а также образование сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ (в некоторых случаях, золота). Ранее нами было показано, что при взаимодействии МПГ с расплавом золота происходит вынос осмия из мелких зёрен (Зайков и др., 2016). Определённое сходство отмечается с золотоносными россыпями Дальнего Востока, в которых преобразование первичных МПГ и образование поздних золота, сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ связаны с гидротермальным изменением дунит-клинопироксенитовых массивов под влиянием гранитоидных магм (Щека и др., 1991).

Источники минералов ЭПГ в россыпях. Преобладание рутения среди МПГ в изученных россыпях является одним из свидетельств офиолитового источника минералов (Tolstykh et al., 2005, 2009; Craw et al., 2013). Источниками МПГ Киалимской россыпи, скорее всего, являются хромитовые руды Карабашского и Таловского ультрамафитовых массивов палеозойского офиолитового меланжа, расположенных приблизительно в 6–7 и 2–3 км к северо-востоку и югу, соответственно (см. рис. 1). В хромититах Карабашского серпентинитового

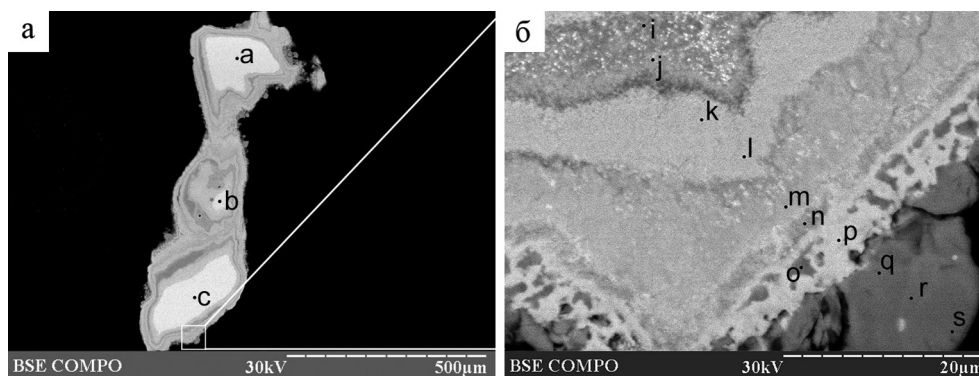


Рис. 11. Общий вид (а) и деталь (б) замещения рутения (точки *a*, *b*, *c*) лауритом (точки *i*, *j*, *q*, *r*, *s*) и ирарситом (точки *k*, *l*) из Малоиремельской россыпи, зерно Ир1-4/1. СЭМ-фото.

Fig. 11. General view (a) and detail (б) of replacement of ruthenium (points *a*, *b*, *c*) by laurite (points *i*, *j*, *q*, *r*, *s*) and irarsite (points *k*, *l*) from Maly Iremel placer, grain Ir1-4/1. SEM images.

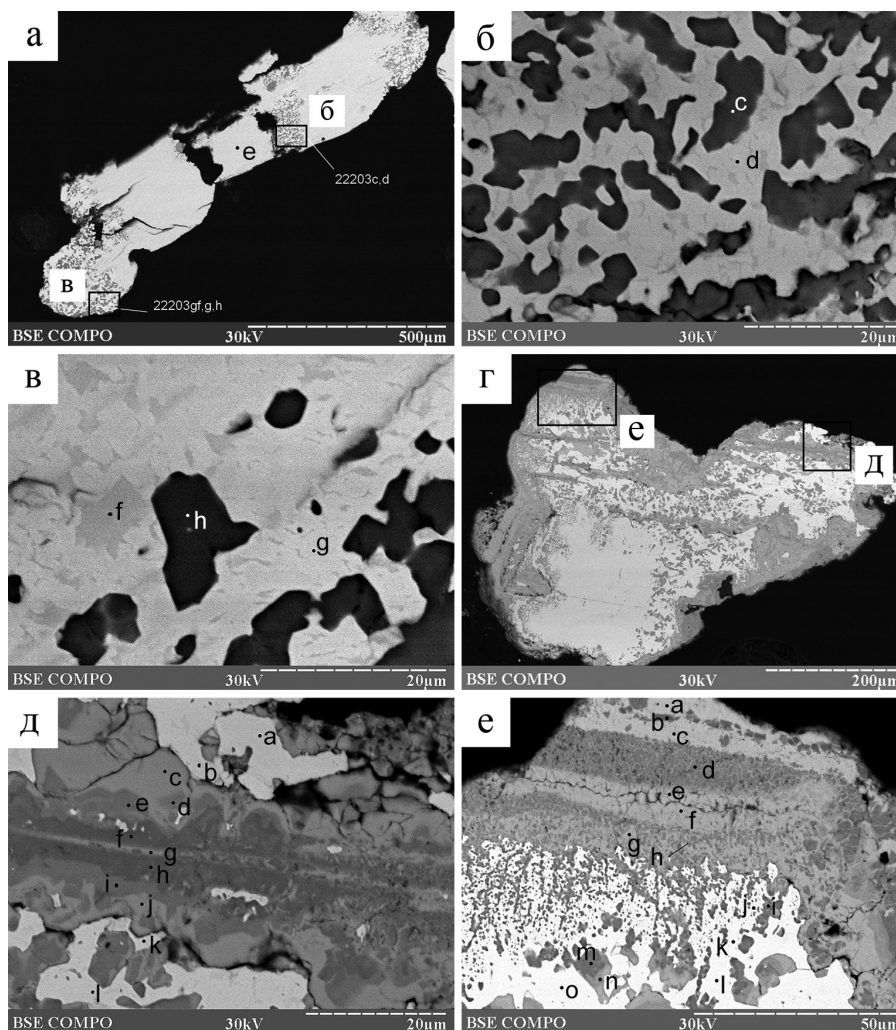


Рис. 12. Срастания минералов Os–Ir–Ru и сульфидов ЭПГ из Малоиремельской россыпи.

а–в – зёрна рутения (точки *e* на рис. а и *f* на рис. в), замещённые лауритом (точки *c*, *h* на рис. б, в) и осмием (точка *g* на рис. в), зерно Ир49–ср3–13; г–е – осмий (точки *a*, *b*, *k*, *l* на рис. д и точки *o*, *k*, *l* на рис. е), рассечённый зональными прожилками с эрликманитом (точки *c*, *j* на рис. д и точки *a*, *c*, *e*, *f*, *g*, *h* на рис. е) и лауритом (точки *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i*, на рис. д и точки *b*, *d*, *m*, *n* на рис. е), зерно Ир1–4. СЭМ-фото.

Fig. 12. Microtextures of aggregates of Os–Ir–Ru minerals and sulfides.

а–в – ruthenium grains (point *e* in fig. а and *f* in fig. в) replaced by laurite (points *c*, *h* in fig. б and в) and osmium (point *g* in fig. в), grain Ir49–sr3–13; г–е – osmium (points *a*, *b*, *k*, *l*) crossed by zonal veinlets with erlichmanite (points *c*, *j*) in selvages and laurite (points *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i*) in the central parts, grain Ir1–4. SEM images.

массива известны находки Ru–Ir осмия в золоте (Зайков и др., 2015). Пробность первичного золота в сростках с МПГ и россыпного золота из Киалимской россыпи идентичны (920–930 ‰). В северной части Таловского ультрамафитового массива известны хромитовые месторождение Сардаткуль и рудопроявления Индашта и Карымкин Лог (Савельев и др., 2008). Точный минеральный состав этих объектов, покрывающих площадь около 3 км², неизвестен, но они являются перспективными для находок в них первичных МПГ.

Источник МПГ для Малоиремельской россыпи связан с ультрамафитовыми породами северной части примыкающего Нуралинского массива, сложенного гарцбургитами и дунитами и представляющего нижний горизонт океанической коры (Золоев и др., 2001). Десять хромитовых рудопроявлений было обнаружено в районе массива, который охватывает верховья р. Иремель. Вкрапленные аксессуарные иридий, осмий и лаурит были найдены в рудопроявлении Мокрая Яма, приуроченного к этому ультрамафитовому массиву (Савельев и др.,

2017). Сходные минералы найдены и в Малоиремельской россыпи.

Интересными представляются находки золото-платиноидных «песчаников», которые указывают на комбинированный источник золота и минералов ЭПГ (например, хромитовые месторождения). Это также подтверждается находками кайм Си-содержащего золота вокруг рутения.

Источниками МПГ в Сулейменовской и Поляковской россыпях являются хромитовые месторождения Нуралинской группы месторождений (Савельев и др., 2008). Так, в Приозёрном проявлении среди хромитов выявлены кристаллы размером 4–5 мкм лаурита и эрликманита (Золоев и др., 2001). В Западно-Шерамбайском проявлении В.В. Зайковым установлены зёрна ферроникельплатины и палладистой платины (Савельев и др., 2017).

Заключение

Проведённые исследования тяжёлых концентратов позволили получить новые данные о минералогии ЭПГ Миасской россыпной зоны, в которой выявлены 24 минерала, включая новые для Урала родарсенит, боуит, купрродсит, ксингцхонгит(?). В Киалимской россыпи обнаружены рутений, осмий, иридий, изоферроплатина, железистая платина, лаурит, эрликманит и толовкит(?). В Малоиремельской россыпи, наряду с перечисленными, выявлены арсениды и сульфоарсениды (родарсенит, рутенарсенит, рутенарсит, иридарсенит). Обнаружены каркасные сростки пластинчатых МПГ, в интерстициях которых расположены агрегаты первичного золота и ксингцхонгита(?). Редкие минералы представлены боуитом, миасситом(?), и неназванными минералами составов $(\text{Rh}_{0.49}\text{Ir}_{0.27}\text{Au}_{0.05})_{\Sigma 0.81}\text{Sb}_{0.80}\text{S}_{1.00}$, $\text{Pt}_{1.11}\text{S}_{2.00}$ и $(\text{Pd}_{2.41}\text{Rh}_{0.43}\text{Fe}_{0.17})_{\Sigma 3.01}(\text{Sb}_{0.91}\text{Te}_{0.09})_{\Sigma 1.00}$. Сульфиды Ni, ассоциирующие с минералами ЭПГ (ваэсит и миллерит), обогащены Ru, Rh и Ir.

Составы рутения в изученных россыпях образуют не только рутениевый, но и осмий-рутениевый тренд. В большинстве случаев, осмий-рутениевый тренд соответствует зёрнам рутения с микровключениями сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ.

В Малоиремельской россыпи выявлены обломки так называемого рудного «песчаника», в котором частицы первичного золота и МПГ цементируются вторичным золотом. Сосуществование золота и МПГ в россыпях традиционно связывается с накоплением продуктов эрозии различных типов

месторождений. Помимо собственно золоторудных месторождений, связанных с листовенитами и служивших источниками золотых россыпей Миасской россыпной зоны, наши данные указывают на возможное существование единого золото-платиноидного источника, которым могут служить хромитовые месторождения.

Хромитовые руды Карабашского и Таловского ультрамафитовых массивов служили одним из источников МПГ для Киалимской россыпи. Это подтверждается находкой в хромититах Карабашского массива кристаллов осмия. В Малоиремельской россыпи МПГ образовались при разрушении хромитовых руд Нуралинского массива, в которых выявлены железистая платина, осмий, иридий, лаурит и эрликманит.

Авторы благодарят Е.В. Белолюб, И.А. Блинова, К.А. Новосёлова, З.С. Никифорову, Ю.А. Иванову, Б.Я. Гисматуллина, Т.П. Нишанбаева, О.Л. Бусловскую и Р.З. Садыкову за помощь в подготовке статьи, а также В.В. Мурзина (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) и Н.Д. Толстых (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за рецензии, которые позволили существенно улучшить статью.

Работа поддержана РФФИ (проект 15-05-00311) и Госзаданием Минобрнауки РФ № 33.2644.2014к.

Литература

Баранников А.Г. Золотоносность Гогинского рудно-россыпного района (Южный Урал). Екатеринбург: УГГУ, 2006. 197 с.

Зайков В.В. Мелентьевское полиметаллическое месторождение Миасского района // *Материалы к минералогии рудных районов Урала*. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 74–79.

Зайков В.В., Дашковский П.К., Зайкова Е.В., Котляров В.А., Юминов А.М., Блинов И.А. Микровключения платиноидов в древних золотых изделиях: распространение, состав, преобразования // *Минералогия*, № 2, 2015. С. 38–57.

Зайков В.В., Таиров А.Д., Зайкова Е.В., Юминов А.М., Котляров В.А. Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Центральной Евразии. Челябинск: Каменный пояс, 2016. 320 с.

Золоев К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Малахов И.А., Мардиросьян А.Н., Хрынов В.Н. Платинометальное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург: Департамент природных ресурсов, 2001. 199 с.

- Иванищев А.В.* Отчёт по теме «Систематизация и разбраковка золоторудных месторождений Свердловской и Челябинской областей». Екатеринбург–Челябинск, 2005ф (фонды «Уралнедра»). 280 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 (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 333–349.
- Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В.* Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 8. С. 1473–1482.
- Ленных Г.А., Нестоянова О.А.* Геологическая карта СССР. Серия Южно-Уральская. N-40-VIII. Уфа, 1956. 252 с.
- Мурзин В.В., Кисин А.Ю., Варламов Д.А.* Минералы платиновой группы из россыпи Мурзинско-Адуйского гранитогнейсового комплекса и их возможные источники // Минералогия. 2015. № 1. С. 34–48.
- Овчинников Л.Н.* Полезные ископаемые и металлогения Урала. М.: Геоинформмарк, 1998. 412 с.
- Петров Ю.М.* Отчёт «Составление карты россыпной золотоносности республики Башкортостан». Уфа, 1999ф.
- Попова В.И.* Месторождения золота Миасской долины // Металлогения древних и современных океанов–2002. Миасс: ИМин УрО РАН, 2002. С. 98–106.
- Попова Е.С., Зайков В.В., Мурзин В.В.* Минералы золота и серебра в рудах Мелентьевского золото-полиметаллического месторождения // Уральский минералогический сборник № 13. Миасс: ИМин УрО РАН, 2005. С. 146–155.
- Пучков В.Н.* Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
- Рожков И.С.* Уральские россыпные месторождения золота / В кн.: 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск: УФАН СССР. 1948. С. 401–503.
- Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин А.Г.* Геология и хромитовосность габбро-гипербазитовых комплексов Южного Урала. Уфа: Гилем, 2008. 319 с.
- Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д.* Хромшпинелиды и акцессорная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал) // Зап. РМО. 2017. № 2 (в печати).
- Салихов Д.Н., Юсупов С.С., Ковалев С.Г., Бердников П.Г., Хамитов К.А.* Полезные ископаемые Республики Башкортостан (металлы платиновой группы). Уфа: Изд-во Экология, 2001. 223 с.
- Серавкин И.Б.* Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: Гилем, 2010. 284 с.
- Сидоров Е.Г.* Платиноносность базит-гипербазитовых комплексов Корьякско-Камчатского региона. Автореф. дисс... докт. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2009. 46 с.
- Толстых Н.Д., Лапухов А.С., Кривенко А.П., Лазарева Е.В.* Минералы элементов платиновой группы в золотоносных россыпях Северо-Западного Салаира // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 916–925.
- Шуб В.С., Баранников А.Г., Шуб И.З.* Золото Урала. Россыпные месторождения (к 250-летию золотой промышленности Урала). Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 134 с.
- Щека С.А., Вржосек А.А., Сапин В.И., Кирюхина Н.И.* Преобразование минералов платиновой группы из россыпей Приморья // Минералогический журнал. 1991. Т. 13. № 1. С. 31–40.
- Bai W., Robinson P.T., Fang Q., Yang J., Yan B., Zhang Z., Xu-Feeng Hu, Zhou M.-F., Malpas J.* The PGE and base metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, Southern Tibet // Can. Mineral. 2000. Vol. 38. P. 585–598.
- Bird J.M., Basset W.A.* Evidence of a deep mantle history in terrestrial osmium–iridium–ruthenium alloys // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85. № 10. P. 5461–5470.
- Cabri L.J., Criddle A.J., Laflamme J.H.G.* Mineralogical study of complex Pt–Fe nuggets from Ethiopia // Bull. Miner. 1981. Vol. 104. P. 508–525.
- Craw D., Mitchell M., McCann R., Reay A.* Compositional variations and morphological evolution in platinum beach placers, southern New Zealand // Mineral. Deposita. 2013. Vol. 48. P. 81–97.
- Fleischer M., Pabst A., Mandarino J.A., Chao G.Y., Cabri L.J.* New mineral names // Am. Mineral. 1976. Vol. 61. P. 174–186.
- Garuti G., Zaccarini F., Cabella R., Fershtater G.* Occurrence of unknown Ru–Os–Ir–Fe oxide in the chromitites of the Nurali ultramafic complex, Southern Urals, Russia // Can. Mineral. 1997. Vol. 35. P. 1431–1440.
- Harris D., Cabri L.* Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision // Can. Mineral. 1991. Vol. 29. P. 231–237.

Koroteev V.A., Boorder H., Necheukhin V.M., Sazonov V.N. Geodynamic setting of the minerals deposits of the Urals // *Tectonophysics*. 1997. Vol. 276. P. 291–300.

Nixon G.T., Cabri L.J., Gilles Laflamme J.H. Platinum-group-element mineralization in lode and placer deposits associated with the Tulameen Alaskan-type complex, British Columbia // *Can. Mineral*. 1990. Vol. 28. P. 503–535.

Raicevic D., Cabri L.J. Mineralogy and concentration of Au- and Pt-bearing placers from the Tulameen River area in British Columbia // *Can. Inst. Mining Metal. Bul.* 1976. Vol. 770. P. 111–119.

Rudashevsky N.S., Avdontsev S.N., Dneprovskaya M.B. Evolution of PGE mineralization in hornolitic dunites of the Mooihoek and Onverwacht pipes, Bushveld Complex // *Miner. Petrol.* 1992. Vol. 47. P. 37–54.

Stumpfl E.F., Tarkian M. Vincentite, a new palladium mineral from south-east Borneo // *Mineral. Mag.* 1974. Vol. 39. P. 525–527.

Tarkian M., Klaska K.-H., Stumpfl E.F. New data on vincentite // *Can. Mineral*. 2002. Vol. 40. P. 457–461.

Tarkian M., Prichard H.M. Irarsite-hollingworthite solid-solution series and other associated Ru-, Os-, Ir-, and Rh-bearing PGM's from the Shetland ophiolite complex // *Miner. Deposita*. 1987. Vol. 22. P. 178–184.

Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., Krivenko A.P., Podlipkiy M. The association of platinum-group minerals in placers of the Pustaya river, Kamchatka, Russia // *Can. Mineral*. 2000. Vol. 38. P. 1251–1264.

Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Krivenko A.P. Platinum-group element placers associated with Ural-Alaska type complexes // in: Mungall J.E. (ed.) *Exploration for platinum-group element deposits*. Mineral. Assoc. Can. Short Course, 2005. Vol. 35, p. 113–143.

Tolstykh N., Sidorov E., Kozlov A. Platinum-group minerals from the Olkhovaya-1 placers related to the Karaginsky ophiolite complex, Kamchatskiy Mys peninsula, Russia // *Can. Mineral*. 2009. Vol. 47. P. 1057–1074.

Поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.