



УДК 552.18

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-1>

## ВТОРИЧНЫЕ МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ РОССЫПИ РЕКИ БОЛЬШОЙ САП (СРЕДНИЙ УРАЛ)

**В.В. Мурзин, К.Н. Малич, А.Ю. Кисин**

*Институт геологии и геохимии УрО РАН им. А.Н. Заварицкого, ул. Ак. Вонсовского 15,  
г. Екатеринбург, 620110 Россия; murzin@igg.uran.ru*

Статья поступила в редакцию 22.11.2024 г., после доработки 09.12.2024 г., принята к печати 22.01.2025 г.

**Аннотация.** Объектом настоящего исследования стали зерна минералов платиновой группы (МПГ) из концентрата, полученного при отработке техногенной золотоносной россыпи вблизи Первомайского дунит-гарцбургитового массива на Среднем Урале. Строение и химический состав зерен изучен методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. На зернах первичных самородных минералов системы Ru-Os-Ir развиты концентрически-зональные каймы вторичных МПГ двух типов: 1) «коррозионные», замещающие первичные МПГ и 2) наложенные, образованные после «коррозионных». «Коррозионные» МПГ слагают участки тонкозернистых или укрупненных агрегатов субграфического (симплектитового) строения и представлены твердыми растворами серии руарсит-осарсит-ирарсит ( $\text{RuAsS-OsAsS-IrAsS}$ ), As-содержащим лауритом ( $\text{Ru(S,As)}_2$ ) (развиты по самородному рутению), As-содержащим эрликманитом ( $\text{Os(S,As)}_2$ ), ирарситом IrAsS (развиты по рутениридосмину), Fe-содержащим иридием (Ir,Os,Fe), толовкитом (IrSbS) и ирарситом (IrAsS) (развиты по иридию). Агрегаты наложенных МПГ имеют массивное строение и формируют внешнюю кайму на зернах первичных МПГ, отлагаясь на них. Наложённые МПГ представлены Fe-содержащим иридием (Ir,Os,Fe) и осмием (Os,Ir,Fe), Ir-Ni-Fe сплавами, в том числе, гарутиитом (Ni, Fe, Ir), Rh-содержащими толовкитом и ирарситом и Ru-содержащим кобальтпентландитом ( $(\text{Ni,Co,Ru})_5\text{S}_8$ ). Предполагается, что «коррозионные» и наложенные вторичные МПГ образованы в условиях декомпрессии, падения всестороннего давления и смены восстановительного режима на окислительный при выдвигении тел гипербазитов к поверхности. Образование самородных вторичных МПГ обусловлено пониженными температурами и восстановительным режимом флюида. Арсениды, сульфоарсениды, стибниды и сульфиды элементов платиновой группы образованы в условиях повышенных значений фугитивности S, As и Sb и смены восстановительных условий на окислительные в верхних частях коры.

**Ключевые слова:** первичные и вторичные минералы платиновой группы, россыпи, условия образования, серпентинизация, офиолиты, Первомайский массив, Средний Урал.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ госрегистрации 122022600107-1).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с рукописью.

**Вклад авторов.** В.В. Мурзин, К.Н. Малич – разработка концепции, исследование; А.Ю. Кисин – исследование, визуализация; В.В. Мурзин – написание черновика рукописи; К.Н. Малич, А.Ю. Кисин – редактирование финального варианта рукописи. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

**Для цитирования:** Мурзин В.В., Малич К.Н., Кисин А.Ю. Вторичные минералы платиновой группы россыпи реки Большой Сап (Средний Урал). Минералогия, 2025, 11(1), 5–16. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-1.

## SECONDARY PLATINUM-GROUP MINERALS FROM A PLACER OF THE BOLSHOY SAP RIVER (CENTRAL URALS)

V.V. Murzin, K.N. Malitch, A.Yu. Kisin

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15,  
 Yekaterinburg, 620110 Russia; murzin@igg.uran.ru

Received 22.11.2024, revised 09.12.2024, accepted 22.01.2025

**Abstract.** The object of the present study includes grains of platinum-group minerals (PGMs) from a concentrate, which was obtained during mining of a technogenic gold placer near the Pervomaisky dunitite-harzburgite massif (Central Urals). The inner structure and chemical composition of grains were studied using scanning electron microscopy and electron microprobe analysis. Grains of primary Ru-Os-Ir minerals are overgrown by concentric-zonal rims of secondary PGMs of two types: 1) “corrosive” PGMs, which replace the primary PGMs, and 2) overprinted PGMs, which formed after “corrosive” PGMs. The “corrosive” PGMs comprise areas of fine- or coarse-grained aggregates of subgraphic (symplectite) structure and include solid solutions of the ruarsite-osarsite-irarsite series (RuAsS-OsAsS-IrAsS) and As-bearing laurite (Ru(S,As)<sub>2</sub>) after native ruthenium, As-bearing erlichmanite (Os(S,As)<sub>2</sub>) and irarsite (IrAsS) after rutheniridosmine and Fe-bearing iridium (Ir,Os,Fe), tolovkite (IrSbS) and irarsite (IrAsS) after native iridium. Aggregates of overprinted PGMs have monolithic structure and form an outer rim on the grains of primary PGMs. The overprinted PGMs include Fe-bearing native iridium (Ir,Os,Fe) and osmium (Os,Ir,Fe), Ir-Ni-Fe alloys, including garutiite (Ni,Fe,Ir), Rh-bearing tolovkite and irarsite, and Ru-bearing cobaltpentlandite ((Ni,Co,Ru)<sub>8</sub>S<sub>8</sub>). It is suggested that secondary “corrosive” and overprinted PGMs formed under conditions of decompression, pressure drop and change from reducing to oxidative regime, when ultramafic bodies moved toward the surface. The formation of secondary native PGMs was caused by low temperatures and reducing fluid regime. Arsenides, sulfoarsenides, stibnides and sulfides of platinum group elements formed under conditions of increased fugacity of S, As and Sb and due to the change from reducing to oxidizing conditions in the upper parts of the crust.

**Keywords:** primary and secondary platinum-group minerals, placers, formation conditions, serpentinization, ophiolites, Pervomaisky massif, Central Urals.

**Funding.** This study was supported by state contract of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (№ 122022600107-1).

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

**Author contribution.** V.V. Murzin, K.N. Malitch – conceptualization, investigation; A.Yu. Kisin – investigation, visualization; V.V. Murzin – writing original draft; K.N. Malitch, A.Yu. Kisin – writing – review & editing. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

**For citation:** Murzin V.V., Malitch K.N., Kisin A.Yu. Secondary platinum-group minerals from a placer of the Bolshoy Sap river (Central Urals). *Mineralogy*, 11(1), 5–16. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-1

### ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных минералов платиновой группы (МПГ), выявленных в массивах офиолитовых гипербазитов и связанных с ними россыпях, обычно выделяются их первичные и вторичные ассоциации (парагенезисы) (Kisileva et al., 2019; Cabri et al., 2022; Airiyants et al., 2022; ). Наиболее отчетливо взаимоотношения этих минералов проявлены в крупных зернах МПГ, которые концентрируются в россыпях. К первичным минералам обычно относят Os-Ir-Ru и Pt-Fe сплавы, а также сульфиды ряда лаурит-эрликманит. Вторичные минералы представлены их последующими генерациями, а также многочисленными сульфидами, арсенидами, анти-

монидами и теллуридами ЭПГ, в составе которых часто присутствуют Cu, Fe, Ni и другие элементы (Cabri et al., 2022). Среди вторичных минералов ранее мы предложили выделять «коррозионные» (псевдоморфные), которые замещают зерна первичных МПГ, и наложенные (новообразованные), обрастающие зерна первичных МПГ, в том числе с замещающими их «коррозионными» минералами (Мурзин и др., 1999).

Объектом настоящего исследования явился концентрат, полученный при отработке техногенной россыпи р. Большой Сап вблизи с. Аятское (координаты россыпи: 57°25'30.55" с. ш., 60°39'18.81" в. д.) на Среднем Урале. Цепочка долинных аллювиальных россыпей по р. Большой Сап прослежи-

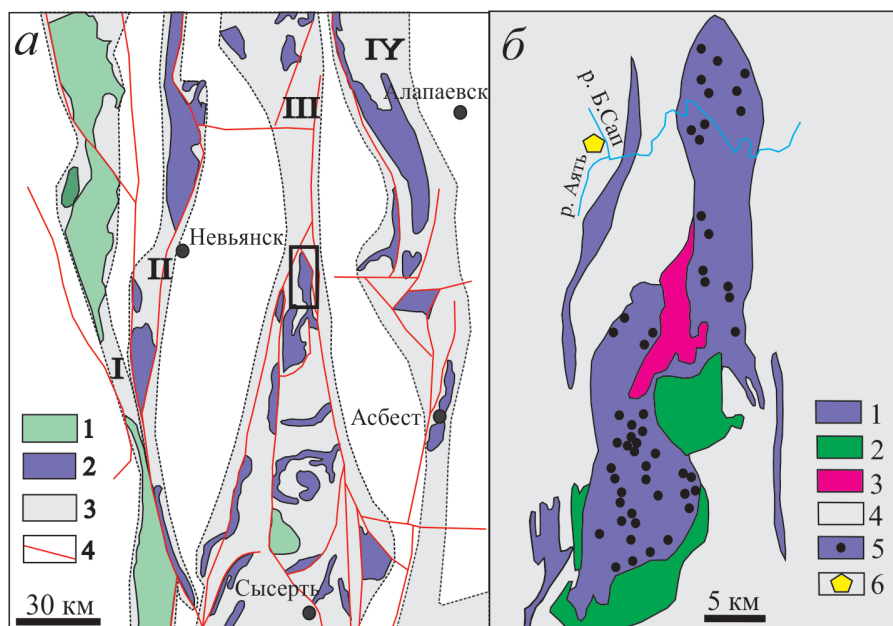


Рис. 1. Прогнозно-металлогеническая карта платиноносных формаций (Золоев и др., 2001) с положением Первомайского массива (прямоугольник) (а) и геологическая схема Первомайского массива (Чашухин и др., 2004) (б).

Рис. 1а: 1 – дунит-клинопироксенит-габбровая ассоциация Платиноносного пояса; 2 – офиолитовая дунит-гарцбургитовая ассоциация; 3 – платиноносные зоны: I – Платиноносного пояса Урала; II – Серовско-Невьянская; III – Салдинско-Сысертская; IV – Алапаевская; 4 – тектонические нарушения.

Рис. 1б: 1 – породы дунит-гарцбургитового комплекса и серпентиниты; 2 – габброиды; 3 – гранитоиды; 4 – вулканогенно-осадочные породы окружения массива; 5 – хромитопоявления; 6 – положение россыпи р. Большой Сап.

Fig. 1. Forecasting metallogenetic map of Pt-bearing complexes (Zoloev et al., 2001) with location of the Pervomaisk massif (rectangle) (a) and geological scheme of the Pervomaisk massif (Chashchukhin et al., 2004) (b).

Fig. 1a: 1 – dunite-clinopyroxenite-gabbro association of the Urals platinum belt; 2 – ophiolite dunite-harzburgite association; 3 – Pt-bearing zones: I – Urals platinum belt; II – Serov-Nevy'ansk; III – Salda-Sysert; IV – Alapaevsk; 4 – faults.

Fig. 1b: 1 – rocks of the dunite-harzburgite complex and serpentinites; 2 – gabbroids; 3 – granitoids; 4 – volcanosedimentary rocks surrounding the massif; 5 – chromite occurrences; 6 – location of placer deposits of the Bol'shoi Sap River.

вается от ее истоков до впадения в р. Аят на протяжении 20 км. Отработанный золотоносный пласт сложен песчано-глинистой массой с галькой и валунами порфиритов и золотоносного кварца. Изученный концентрат представлен магнетитом, кварцем, хромшпинелидом, ильменитом, самородным золотом и редкими зернами МПГ, циркона, рутила, лейкоксена, киновари. Коренные источники МПГ мы связываем с Первомайским гипербазитовым массивом, располагающимся в Салдинско-Сысертской платиноносной зоне (рис. 1а).

Среди МПГ в концентрате присутствуют зерна самородных металлов системы Os-Ir-Ru (осмий, иридий, рутений, рутениридосмин) и Pt-Fe сплавов, близких по составу к изоферроплатине, а также сульфидов ряда лаурит-эрликманит, отнесенных нами к первичным МПГ. На значительной части зерен первичных самородных Os-Ir-Ru сплавов присутствуют каймы, сложенные вторичными МПГ. Выявлению строения этих оболочек, их минераль-

ного состава, а также изучению химического состава вторичных минералов посвящена данная статья.

#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Река Большой Сап вместе с долинными россыпями располагается в западном обрамлении северной части Первомайского массива, дренируя вмещающие вулканогенно-осадочные породы, в которых заключены многочисленные мелкие линзовидные тела серпентинитов (рис. 1б).

По данным И.С. Чашухина с соавторами (2004) Первомайский массив сложен апогарцбургитовыми антигоритовыми и хризотил-лизардитовыми серпентинитами, залегающими в вулканогенно-осадочных породах среднепалеозойского возраста (рис. 1б). В северной части массива среди апогарцбургитовых серпентинитов развиты дуни-

ты и аподунитовые серпентиниты, которые образуют субмеридионально вытянутые линзовидные тела протяженностью до 3 км. С юга гипербазиты окружены почти непрерывной полосой габброидов, отделенных от гарцбургитов породами дунит-верлит-клинопироксенитового комплекса. В центральную часть массива внедрено тело гранитоидов протяженностью около 15 км, содержащее ксенолиты серпентинитов, которое разделяет поле ультрамафитов на две части: северо-восточную и юго-западную. В массиве известно большое количество небольших месторождений хрома, концентрирующихся в Северном, Центральном и Южном рудных полях (Чашухин и др., 2004).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования химического состава платиноидной минерализации использован комплекс методов, включающий сканирующую электронную микроскопию (JEOL-JSM6390LV) и рентгеноспектральный микроанализ (Cameca SX 100 с пятью волновыми спектрометрами, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия). Количественный анализ проведен с использованием следующих рентгеновских спектральных линий и стандартных образцов: *OsMa*, *IrLa*, *RuLa*, *RhLa*, *PtLa*, *PdLβ*, *NiKa* (все чистые металлы), *FeKa*, *CuKa*, *SKa* (халькопирит), *AsLa* (сплав InAs); учтено наложение спектральных линий (*RuLa* на *AsLa*; *RuLβ* на *RhLa*; *IrLa* на *CuKa*). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, сила тока пучка электронов – 20 нА, длительность измерения интенсивности на пике – 10 с, на фоне – по 5 с, диаметр точки анализа – 2 мкм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вторичные МПГ россыпи р. Большой Сап наиболее широко проявлены в зернах иридия, в меньшей степени, рутения и рутениридосмина и отсутствуют в первичных Pt-Fe сплавах и Os-Ir-Ru сульфидах. В большинстве зерен вторичные минералы слагают каймы мощностью до 50 мкм на зернах первичных минералов, замещая или обрастая их. Мелкие зерна первичных МПГ часто замещаются вторичными. Оболочки вторичных МПГ на зернах первичных Os-Ir-Ru сплавов полиминеральные (табл. 1) и, как правило, зональные (рис. 2–4). Химический состав вторичных минералов приведен в табл. 2.

На зернах рутения образуются зональные корки радиально-лучистого строения, сложенные «коррозионными» As-содержащим лауритом и (Ni,Co)-содержащим твердым раствором руарсит-осарсит-ирарсита (*RuAsS-OsAsS-IrAsS*) (рис. 2а). В зернах рутения и рутениридосмина вторичные МПГ представлены As-содержащим эрликманитом и ирарситом, корродирующими поверхность зерен или развивающимися внутри них в виде ветвящихся микропрожилков (рис. 2б).

Наиболее разнообразны зональность и минеральный состав вторичных МПГ в зернах иридия (рис. 2в). В общем виде в этих зернах выделяются несколько зон: а) зона тонкозернистой смеси (участками субграфической) самородных, сульфидных и сульфоарсенидных фаз, замещающих первичные сплавы и отнесенных нами к «коррозионным» МПГ; б) зона минералов укрупненного субграфического (симплектитового) агрегата и в) внешняя зона массивного строения. Минералы двух последних зон отнесены нами к наложенным (табл. 2).

Зона тонкой пористой «коррозионной» субграфической смеси сложена ламеллами Fe-содержащего иридия и в меньшем количестве сульфида Ir, Ni, Fe и Cu, предположительно, куваевита ( $\text{Ir}_5\text{Ni}_{10}\text{S}_{16}$ ) (Барков и др., 2022) в матрице ирарсита *IrAsS* (рис. 2г) или толовкита *IrSbS* (рис. 3). Субмикронный размер минералов в зоне тонкой субграфической смеси не позволяет выполнить количественные анализы их состава, однако по распределению элементов на картах концентраций (рис. 3) видно, что в направлении от реликтовой части зерна иридия в его центре смесь Fe-содержащего иридия и толовкита сменяется смесью Fe-содержащего иридия и ирарсита. Зона укрупненной субграфической смеси в этом зерне отсутствует, а наложенный ирарсит во внешней его части проникает в радиальные микротрещины внутренних зон тонкой субграфической смеси.

Зона укрупненного субграфического агрегата в некоторых зернах отсутствует (рис. 3а), в других она занимает промежуточное положение между реликтовой частью зерна иридия и наложенной каймой массивного ирарсита (рис. 4). Укрупненный субграфический агрегат сложен пластинками Fe-содержащего иридия, ориентированными по направлению к контакту реликтовой части зерна и сцементированными толовкит-ирарситовой массой. В некоторых зернах в зоне укрупненного субграфического агрегата присутствуют угловатые включения Ru-содержащего кобальтпентландита.

Таблица 1

Вторичные МПГ в зернах первичных Ru-Os-Ir сплавов

Table 1

Secondary PGMs in grains of primary Ru-Os-Ir alloys

Первичные минералы	«Коррозионные» минералы	«Наложенные» минералы
Рутений	Ni,Co-содержащие твердые растворы руарсит-осарсит-ирарсит (RuAsS-OsAsS-IrAsS), As-содержащий лаурит RuS <sub>2</sub>	Не выявлены
Рутениридосмин	As-содержащий эрликманит OsS,As) <sub>2</sub> , ирарсит IrAsS	Не выявлены
Иридий	Fe-содержащий иридий, неназванный МПГ (Ir,Ni,Fe), толовкит IrSbS, ирарсит IrAsS	Fe-содержащий иридий (Ir,Os,Fe), Fe-содержащий осмий (Os,Ir,Fe), неназванный МПГ (Ir,Ni,Fe), гаругит (Ni,Fe,Ir), Rh-содержащий толовкит (Ir,Rh)SbS, Rh-содержащий ирарсит (Ir,Rh)AsS, Ru-содержащий кобальтпентландит (Ni,Co) <sub>95</sub> S <sub>8</sub>

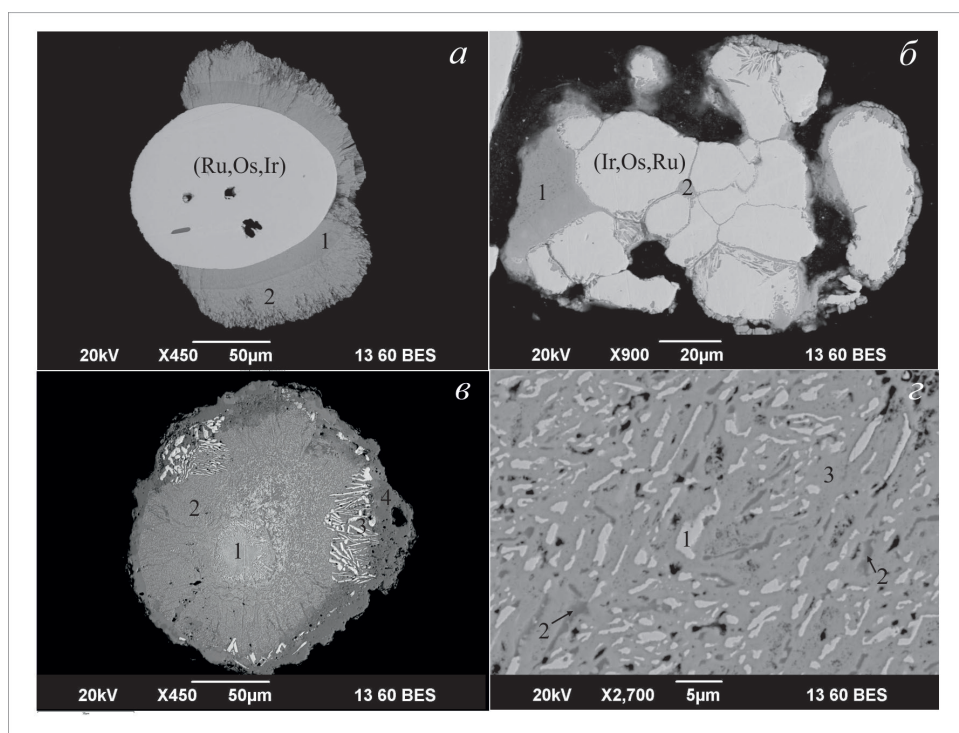


Рис. 2. Зональность зерен минералов системы Ru-Os-Ir (а, б) и кубического иридия (в, г) с вторичными «коррозионными» и «наложенными» парагенезисами: а – округлое зерно рутения (Ru,Os,Ir) с зональной пористо-трещиноватой каймой As-содержащего лаурита (1) и (Ni,Co)-содержащего твердого раствора RuAsS-OsAsS-IrAsS (2); б – зерно рутениридосмина (Ir,Os,Ru) с развивающемся по нему As-содержащему эрликманиту (1) и ирарситу (2); в – зональное зерно иридия (1), замещенного тонкозернистой смесью самородных, сульфидных и сульфоарсенидных фаз (2) с участками субграфического строения; краевая зона сложена укрупненным субграфическим агрегатом Ir-Os сплава (3), обрастающим ирарситом и толовкитом (4); г – субграфический агрегат ламелл Fe-содержащего иридия и, предположительно, куваевита (2) в ирарсита (3).

Fig. 2. Zonation of hexagonal Ru-Os-Ir minerals (a, б) and cubic iridium (в, г) with secondary corrosive and overprinted assemblages: а – round ruthenium grain (Ru,Os,Ir) with zoned porous fractured As-bearing laurite rim (1) and (Ni,Co)-bearing solid solution RuAsS-OsAsS-IrAsS series (2); б – rutheniridosmine grain (Ir,Os,Ru) with As-bearing erlichmanite (1) and irarsite (2); в – zoned grain of iridium (1) replaced by fine-grained mixture of native phases, sulfides and sulfoarsenides (2) with areas of subgraphitic structure; the marginal zone is composed of an enlarged subgraphitic aggregate of the Ir-Os alloy (3) overgrown by irarsite and tolovkite (4); г – subgraphitic aggregate of lamellae of Fe-bearing iridium and, probably, kuvaevite (2) in irarsite (3).

Таблица 2

## Химический состав вторичных МПГ из россыпи р. Большой Сап, мас. %

Table 2

## Chemical composition of secondary PGMs from the Bolshoi Sap River placer, wt. %

№ п/п	№ зерна	Ir	Os	Ru	Pt	Pd	Rh	Fe	Ni	Co	Cu	As	Sb	S	Сумма
1	68-3	66.27	<i>0.12</i>	<i>0.06</i>	2.57	<i>0.08</i>	–	11.12	16.11	0.50	0.16	–	<i>0.05</i>	–	97.04
2	68-4	49.84	0.40	<i>0.06</i>	2.13	<i>0.14</i>	<i>0.08</i>	11.47	31.22	0.70	0.72	<i>0.07</i>	0.36	–	97.19
3	102-2	42.31	49.47	1.53	1.04	0.05	0.00	1.96	0.61	<i>0.02</i>	0.08	–	–	<i>0.02</i>	97.09
4	20-3	49.82	44.37	<i>0.09</i>	–	<i>0.07</i>	<i>0.03</i>	2.76	0.20	<i>0.03</i>	0.06	<i>0.02</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>	97.48
5	74-3	53.42	40.52	<i>0.09</i>	–	<i>0.11</i>	–	3.8	0.23	<i>0.05</i>	0.09	–	–	–	98.31
6	8-1	2.00	1.08	7.45	0.32	0.09	0.06	2.11	29.07	26.30	0.01	–	0.02	31.56	100.07
7	8-2	2.91	0.97	7.11	0.46	0.04	0.10	2.01	28.47	25.40	0.15	–	–	31.39	99.01
8	103-2	38.24	–	–	<i>0.17</i>	<i>0.04</i>	9.81	<i>0.01</i>	<i>0.05</i>	–	–	0.29	38.52	10.56	97.69
9	2-3	49.58	<i>0.02</i>	0.16	0.53	–	0.45	–	<i>0.06</i>	<i>0.01</i>	0.14	1.13	36.46	9.76	98.3
10	20-2	54.49	0.16	0.74	2.94	<i>0.06</i>	0.64	<i>0.02</i>	0.37	0.16	0.14	24.20	2.22	11.77	97.91
11	46-2	51.56	0.53	0.80	4.08	–	0.85	0.07	0.29	0.18	0.13	26.13	1.07	11.76	97.45
12	74-2	55.66	0.43	0.69	2.41	–	0.82	–	<i>0.07</i>	0.16	0.03	26.25	0.12	11.65	98.29
13	94-2	56.19	<i>0.15</i>	<i>0.23</i>	1.42	–	0.16	<i>0.03</i>	<i>0.02</i>	0.22	<i>0.03</i>	23.55	4.25	11.45	97.70
14	31-3	55.15	<i>0.03</i>	0.36	1.45	<i>0.04</i>	0.97	<i>0.02</i>	0.28	0.42	<i>0.03</i>	24.63	3.09	11.77	98.24
15	67-2	44.84	38.56	10.32	<i>0.05</i>	–	<i>0.03</i>	2.16	1.44	0.12	<i>0.02</i>	–	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	97.56
16	80-2	14.14	17.95	18.17	1.41	<i>0.02</i>	0.51	0.53	2.22	2.31	0.08	20.43	0.08	21.70	99.55
17	80-3	14.09	16.57	16.45	1.39	–	0.38	0.62	2.26	1.82	0.06	33.44	0.08	13.31	100.47
18	50-2	9.86	48.53	6.69	3.01	<i>0.10</i>	0.83	0.87	<i>0.04</i>	0.23	0.20	4.79	0.04	25.66	100.85
19	50-3	54.06	0.30	<i>0.20</i>	1.05	–	3.58	<i>0.07</i>	–	<i>0.03</i>	0.09	25.55	0.45	12.48	97.86

## Кристаллохимические формулы и минералы

1	(Ir <sub>0.41</sub> Ni <sub>0.32</sub> Fe <sub>0.24</sub> Pt <sub>0.02</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> – неназванный МПГ
2	(Ni <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.25</sub> Fe <sub>0.20</sub> Co <sub>0.01</sub> Cu <sub>0.01</sub> Pt <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> – гарутиит
3	(Os <sub>0.47</sub> Ir <sub>0.40</sub> Fe <sub>0.07</sub> Ru <sub>0.03</sub> Ni <sub>0.02</sub> Pt <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> – Fe-содержащий осмий
4	(Ir <sub>0.47</sub> Os <sub>0.43</sub> Fe <sub>0.09</sub> Ni <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> – Fe-содержащий иридий
5	(Ir <sub>0.49</sub> Os <sub>0.38</sub> Fe <sub>0.12</sub> Ni <sub>0.01</sub> ) <sub>1.00</sub> – Fe-содержащий иридий
6	(Ni <sub>4.10</sub> Co <sub>3.69</sub> Ru <sub>0.61</sub> Fe <sub>0.31</sub> Ir <sub>0.09</sub> Os <sub>0.05</sub> Pt <sub>0.01</sub> Pd <sub>0.01</sub> ) <sub>8.86</sub> S <sub>8.14</sub> – Ru-содержащий кобальтпентландит
7	(Ni <sub>4.07</sub> Co <sub>3.61</sub> Ru <sub>0.59</sub> Fe <sub>0.30</sub> Ir <sub>0.13</sub> Os <sub>0.04</sub> Pt <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.02</sub> Pd <sub>0.01</sub> ) <sub>8.86</sub> S <sub>8.14</sub> – Ru-содержащий кобальтпентландит
8	(Ir <sub>0.64</sub> Rh <sub>0.30</sub> ) <sub>0.94</sub> Sb <sub>1.00</sub> S <sub>1.04</sub> – Rh-содержащий толовкит
9	(Ir <sub>0.87</sub> Rh <sub>0.01</sub> Ru <sub>0.01</sub> Pt <sub>0.01</sub> Cu <sub>0.01</sub> ) <sub>0.91</sub> (Sb <sub>1.01</sub> As <sub>0.05</sub> ) <sub>1.06</sub> S <sub>1.03</sub> – толовкит
10	(Ir <sub>0.82</sub> Pt <sub>0.04</sub> Ni <sub>0.02</sub> Rh <sub>0.02</sub> Ru <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.01</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>0.94</sub> (As <sub>0.94</sub> Sb <sub>0.05</sub> ) <sub>0.99</sub> S <sub>1.07</sub> – ирарсит
11	(Ir <sub>0.78</sub> Pt <sub>0.06</sub> Ni <sub>0.01</sub> Rh <sub>0.02</sub> Ru <sub>0.02</sub> Cu <sub>0.01</sub> Co <sub>0.01</sub> Os <sub>0.01</sub> ) <sub>0.92</sub> (As <sub>1.00</sub> Sb <sub>0.03</sub> ) <sub>1.03</sub> S <sub>1.05</sub> – ирарсит
12	(Ir <sub>0.84</sub> Pt <sub>0.04</sub> Rh <sub>0.02</sub> Ru <sub>0.02</sub> Co <sub>0.01</sub> Os <sub>0.01</sub> ) <sub>0.94</sub> As <sub>1.01</sub> S <sub>1.05</sub> – ирарсит
13	(Ir <sub>0.88</sub> Pt <sub>0.02</sub> Ni <sub>0.01</sub> Ru <sub>0.01</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>0.92</sub> (As <sub>0.93</sub> Sb <sub>0.10</sub> ) <sub>1.03</sub> S <sub>1.05</sub> – ирарсит
14	(Ir <sub>0.83</sub> Rh <sub>0.03</sub> Pt <sub>0.02</sub> Co <sub>0.02</sub> Ni <sub>0.01</sub> Ru <sub>0.01</sub> ) <sub>0.92</sub> (As <sub>0.95</sub> Sb <sub>0.07</sub> ) <sub>1.02</sub> S <sub>1.06</sub> – ирарсит
15	(Ir <sub>0.39</sub> Os <sub>0.34</sub> Ru <sub>0.17</sub> Fe <sub>0.06</sub> Ni <sub>0.04</sub> ) <sub>1.00</sub> – Fe-содержащий иридий
16	(Ru <sub>0.39</sub> Os <sub>0.20</sub> Ir <sub>0.16</sub> Co <sub>0.08</sub> Ni <sub>0.08</sub> Fe <sub>0.02</sub> Pt <sub>0.02</sub> Rh <sub>0.01</sub> ) <sub>0.96</sub> (S <sub>1.45</sub> As <sub>0.59</sub> ) <sub>2.04</sub> – As-содержащий лаурит
17	(Ru <sub>0.38</sub> Os <sub>0.20</sub> Ir <sub>0.17</sub> Ni <sub>0.09</sub> Co <sub>0.07</sub> Fe <sub>0.03</sub> Pt <sub>0.02</sub> Rh <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> As <sub>1.05</sub> S <sub>0.97</sub> – руарсит-осарсит-ирарсит
18	(Os <sub>0.61</sub> Ru <sub>0.15</sub> Ir <sub>0.12</sub> Fe <sub>0.04</sub> Pt <sub>0.04</sub> Co <sub>0.01</sub> Cu <sub>0.01</sub> ) <sub>0.98</sub> (S <sub>1.87</sub> As <sub>0.15</sub> ) <sub>2.02</sub> – As-содержащий эрликманит
19	(Ir <sub>0.80</sub> Rh <sub>0.10</sub> Pt <sub>0.02</sub> Ru <sub>0.01</sub> ) <sub>0.93</sub> (As <sub>0.96</sub> Sb <sub>0.01</sub> ) <sub>0.97</sub> S <sub>1.10</sub> – Rh-содержащий ирарсит

*Примечание.* Анализы 1–14 и 15–19 – состав наложенных и «коррозионных» минералов, соответственно. Курсивом выделены определения в пределах погрешности 2σ. Прочерк – элемент не обнаружен. Кристаллохимические формулы рассчитаны исходя из количества атомов в теоретической формуле минералов.

*Note.* Analyses 1–14 and 15–19 – the composition of overprinted and corrosive minerals, respectively. The analyses within 2σ error are italicized. Dash – not detected. Crystal chemical formulas are calculated based on the number of atoms in theoretical formula of minerals.

Внешняя зона в зернах иридия сложена присутствующими в различных соотношениях ирарситом и толовкитом (рис. 3, 4).

К вторичным минералам относятся также фазы варьирующего состава, принадлежащие тройным Ir-Ni-Fe сплавам. В некоторых зернах иридий

в этих сплавах преобладает над никелем и железом (Ir,Ni,Fe) (табл. 2, ан. 1) и образует совместные сростания с Rh-содержащим толовкитом (рис. 5а). В других случаях сплав состава (Ir,Ni,Fe) присутствует в составе зональных зерен. В центральной части зерен сплав образует тонкозернистый агрегат

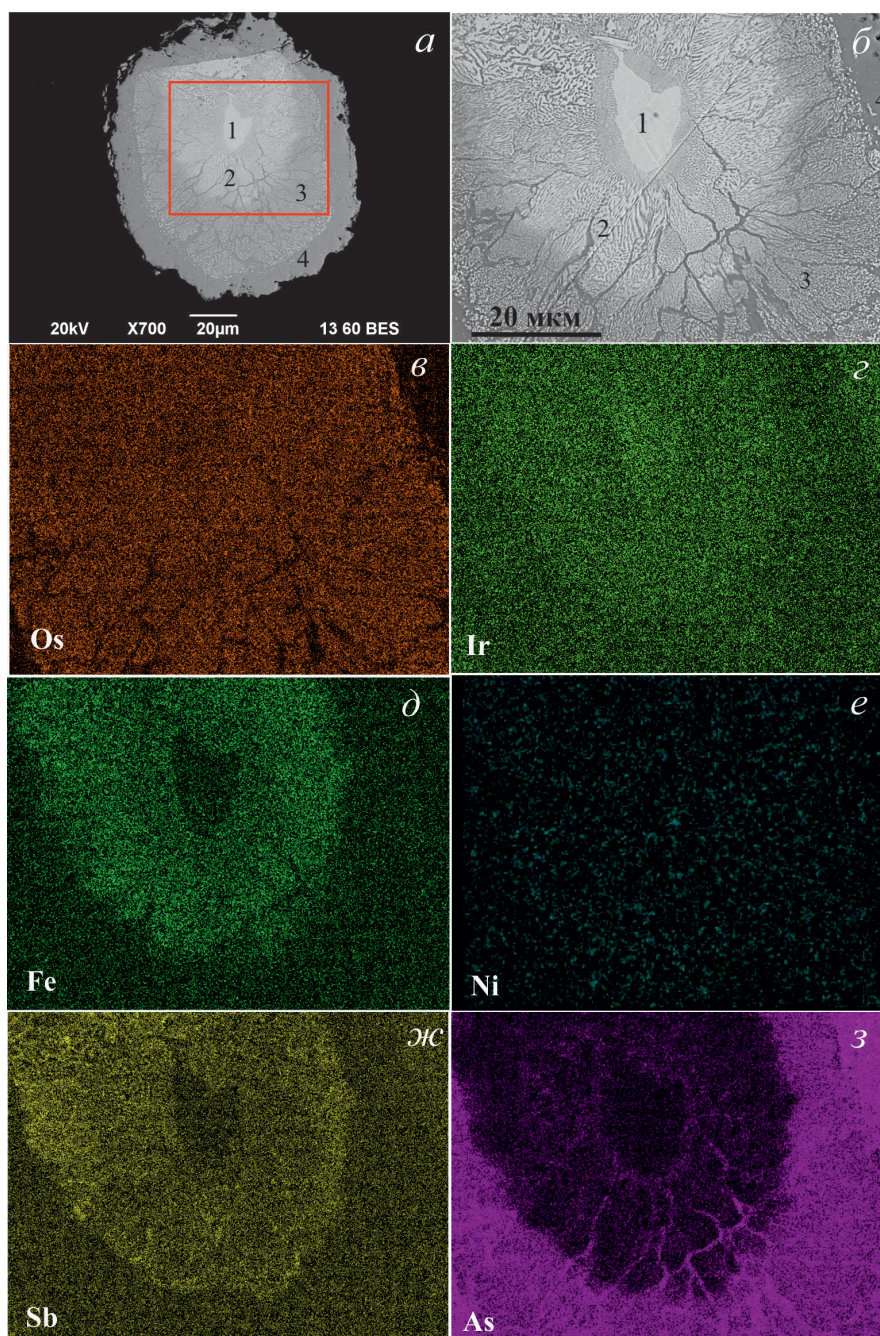


Рис. 3. Зональные вторичные МППГ в зерне первичного иридия, мелкий реликт которого сохранился в центральной части.

Зоны: 1 – реликтовая часть зерна; 2, 3 – коррозионные минералы: 2 – тонкая субграфическая смесь Fe-содержащего иридия и толовкита; 3 – тонкозернистый агрегат иридия и ирарсита; 4 – оболочка зерна – наложенный монокристаллический ирарсит. Общий вид (а) и деталь его центральной части (б), BSE фото; карты концентраций в рентгеновском излучении Os (в), Ir (г), Fe (д), Ni (е), Sb (ж) и As (з).

Fig. 3. Zoned secondary PGMs in primary iridium grain, a small relic of which is preserved in the central part.

Zones: 1 – relict part of the grain; 2, 3 – corrosive minerals: 2 – thin subgraphitic mixture of Fe-bearing iridium and tolovkite; 3 – fine-grained aggregate of iridium and irarsite; 4 – grain rim consisting of overprinted monolithic irarsite. General view (a) and detail of its central part (б), BSE images; elemental maps for Os (в), Ir (г), Fe (д), Ni (е), Sb (ж) and As (з).

в сростании с Fe-иридием, а во внешней зоне выявлены пластинки осмия и сплав с преобладанием никеля (Ni,Ir,Fe) (рис. 5б). Сплавы (Ni,Ir,Fe) близки по

составу к гарутииту, который является гексагональным полиморфом самородного никеля (McDonald et al., 2010).

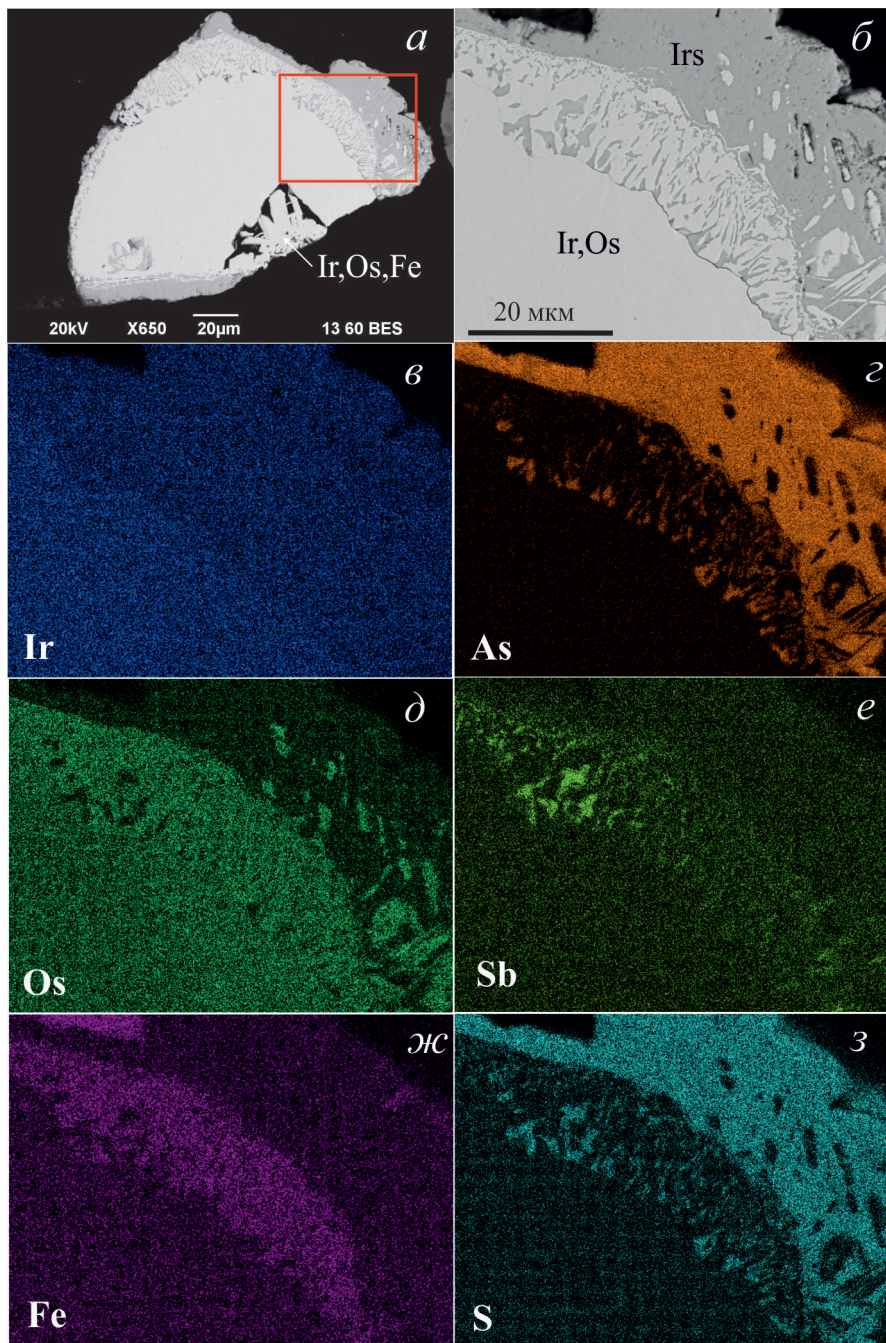


Рис. 4. Изображения иридия (Ir,Os) с зонами укрупненной субграфической смеси и монокристаллической внешней каймы (а) и его краевого участка (б) в обратно-рассеянных электронах и карты концентраций Ir (в), As (г), Os (д), Sb (е), Fe (ж) и S (з). Зона субграфической смеси сложена ламеллями Fe-содержащего иридия, сцементированных ирарситом (Irs) и толовкитом, а внешняя кайма ирарситом.

Fig. 4. BSE images of iridium (Ir,Os) with areas of enlarged subgraphics and a monolithic outer rim (a) and its margin (б); elemental maps for Ir (в), As (г), Os (д), Sb (е), Fe (ж) and S (з).

The subgraphitic zone is composed of lamellae of Fe-bearing iridium enclosed in irarsite (Irs) and tolovkite. The outer rim consists of irarsite.



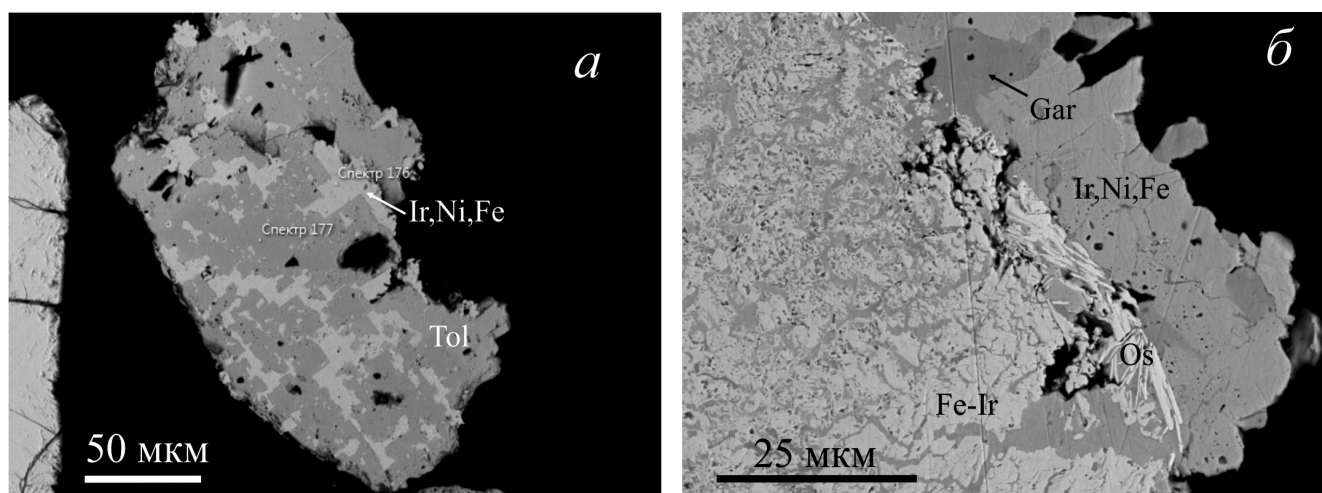


Рис. 5. Взаимоотношения вторичных Ir-Ni-Fe сплавов: а – агрегат фазы (Ir,Ni,Fe) и Rh-содержащего толовкита (Tol); б – краевая часть зерна, сложенного агрегатом Fe-содержащего иридия (Fe-Ir) и коррозионного Ir-Ni-Fe сплава и каймой с пластинками наложенных осмия (Os), Ir-Ni-Fe сплава и гарутиита (Gar).

Fig. 5. Relationships of secondary Ir-Ni-Fe alloys: а – aggregate of Ir-Ni-Fe alloy and Rh-bearing tolovkite (Tol); б – marginal part of a grain composed of aggregate of Fe-bearing iridium (Fe-Ir) and corrosive Ir-Ni-Fe alloy and a rim with plates of overprinted osmium (Os), Ir-Ni-Fe alloy and garutiite (Gar).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Видовой состав МПГ россыпи р. Большой Сап в целом характерен для многих россыпей мира, связанных с офиолитовыми гипербазитами (Cabri et al., 2022). Первичные минералы Os-Ir-Ru ассоциации в изученной россыпи представлены самородными минеральными видами (осмий, рутений, рутениридосмин, иридий), а также сульфидами ряда лаурит-эрликманит. Вторичные МПГ Os-Ir-Ru ассоциации включают как самородные минералы этих элементов, так и сульфоарсениды и сульфоантимониды. Другая особенность вторичных Os-Ir-Ru минералов связана с высокой подвижностью при их образовании не только As, Sb и S, но и благородных металлов, прежде всего Fe и Ni. Так, содержание Fe во вторичных осмии и иридии повышается до 2.0–3.2 мас. % (табл. 2) по отношению к его содержанию в первичных осмии и иридии, не превышающем 0.7 мас. %. Железо и Ni концентрируются и в собственных вторичных минералах – Ir-Ni-Fe сплавах, в том числе, гарутиите, и Ru-содержащем кобальтпентландите (табл. 2). Замещение самородных иридия и осмия сульфидами, арсенидами и стибнидами ЭПГ наблюдалось ранее в хромититах Карабашского массива на Южном Урале (Попова и др., 2022).

Разнообразие МПГ и особенности состава отдельных минералов могут быть обусловлены различным генезисом хромитов, в которых заключены

МПГ. Хромитовое оруденение в офиолитовых массивах Среднего Урала является гетерогенным, что обусловлено участием в их формировании магматических и метасоматических процессов в различных соотношениях (Чашухин и др., 2005; Чашухин, 2019). Хромититы кемпирсайского типа отнесены к латераль-секреционному типу и образованы в результате переотложения хрома из нижележащих непромышленных дунит-хромититовых породных ассоциаций под воздействием высокотемпературных восстановленных флюидов (Штейнберг и др., 1990). В Первомайском массиве широко развиты метасоматические хромититы, связанные с локальной метаморфической дифференциацией вмещающих гарцбургитов с ранее сформированным латераль-секреционным оруденением (Чашухин и др., 2004, 2005). Метасоматические хромититы сформированы более окисленными флюидами по отношению к латераль-секреционным. Кроме того, в них выделяются также наиболее поздние реакционно-метасоматические железистые хромититы оманского типа, образованные в результате реакции габброидного расплава и связанных с ним растворов с породами дунит-гарцбургитового комплекса с ранними типами хромититов (Чашухин и др., 2005). В Первомайском массиве латераль-секреционные хромититы развиты в северной его части, метасоматические на всей площади, а реакционно-метасоматические в центральной части (Чашухин и др., 2004). Широкий видовой состав вторичных

МПП в россыпи р. Большой Сап, таким образом, согласуется с полигенной природой хромититов и участием метасоматитизирующих постмагматических флюидов.

Вторичные МПП в офиолитовых массивах обычно связываются с более низкотемпературными процессами серпентинизации, реже, хлоритизации (Garuti, Zaccarini, 1997; Zaccarini et al., 2008, 2022; Kiseleva et al., 2019; Farré-de-Pablo et al., 2022). На Среднем Урале вторичные МПП наблюдались нами в хромититах Алапаевского массива. Здесь вторичные минералы благородных металлов образованы при температуре ниже 350 °С совместно с гранатом, амфиболом, хлоритом и сульфидами никеля (Мурзин и др., 2023б). Зерна первичных Os-Ir-Ru сплавов при эпигенетических процессах подверглись сульфуризации с образованием тонкозернистой пористой смеси самородных и сульфидных (иногда с As) минералов, а также замещению их Ru-содержащим пентландитом.

Субграфическое (симплектитовое) и радиально-лучистое строение вторичных МПП в россыпи р. Большой Сап может свидетельствовать об их образовании в условиях декомпрессии и падении всестороннего давления при продвижении тел гипербазитов к поверхности. Подобные условия ранее нами отмечались для зерен граната, магнетита, сульфидно-самородных «желваков» в Полдневском месторождении демантоида (Мурзин и др., 2023а). Наложенные гидротермальные минералы отлагались из наиболее позднего флюида в открытом пространстве, о чем свидетельствуют их массивное строение и частое присутствие на поверхности зерен МПП в виде хорошо ограненных кристаллов. Появление гарутиита и Fe-содержащего иридия обусловлено пониженными температурами и восстановительным режимом флюида. Арсениды, сульфоарсениды, стибниды и сульфиды элементов платиновой группы образованы в условиях повышенных значений фугитивности S, As и Sb и обусловлены сменой восстановительных условий образования окислительными в верхних земной частях коры (Barkov et al., 2018; Kiseleva et al., 2020).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В россыпи р. Большой Сап (Средний Урал) присутствуют МПП, отнесенные к первичным (ранним) и вторичным (поздним) образованиям. Среди вторичных минералов выделяются «коррозионные», замещающие зерна первичных МПП, и нало-

женные (новообразованные), обрастающие первичные зерна. Вторичные МПП развиты на зернах первичных Ru-Os-Ir сплавов и отсутствуют на зернах Os-Ru сульфидов и Pt-Fe сплавов.

2. «Коррозионные» минералы представлены (Ni,Co)-содержащими твердыми растворами серии руарсит-осарсит-ирарсит (RuAsS-OsAsS-IrAsS), As-содержащим лауритом (развиты по рутению), As-содержащим эрликманитом, ирарситом (развитыми по рутениридосмину), Fe-содержащим иридием, толовкитом, ирарситом (развитыми по иридию). Наложенные минералы отлагались на зернах иридия; они представлены Fe-содержащими иридием и осмием, сплавами системы Ir-Ni-Fe, в том числе гарутиитом (Ni,Ir,Fe), Rh-содержащими толовкитом и Rh-ирарситом, Ru-содержащим кобальтпентландитом. Наложенные МПП образовались из наиболее позднего относительно низкотемпературного флюида в открытом пространстве.

3. Широкий видовой состав МПП согласуется с полигенностью хромититов в Первомайском массиве (латераль-секреционные, метасоматические и реакционно-метасоматические) и участием метасоматизирующих постмагматических флюидов.

4. Предполагается, что вторичные «коррозионные» и наложенные МПП образованы в условиях декомпрессии, падении всестороннего давления, смене восстановительного режима на окислительный при выдвигании тел гипербазитов к поверхности. Образование самородных вторичных МПП обусловлено пониженными температурами и восстановительным режимом флюида. Арсениды, сульфоарсениды, стибниды и сульфиды элементов платиновой группы сформированы в условиях повышенных значений фугитивности S, As и Sb и сменой восстановительных условий окислительными в верхних частях коры.

## ЛИТЕРАТУРА

Барков А.Ю., Толстых Н.Д., Мартин Р.Ф., Тамура Н., Чи М., Никифоров А.А. (2022) Куваевит (Ir<sub>5</sub>Ni<sub>10</sub>S<sub>16</sub>) – новый минеральный вид, его ассоциации и особенности генезиса (россыпная зона р. Сисим, Восточный Саян). *Геология и геофизика*, 63(12), 1653–1669. <https://doi.org/10.15372/GiG2022114>

Золов К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Малахов И.А., Мардиросьян А.Н., Хрыпов В.Н. (2001) Платинометалльное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург, УГСЭ, 199 с.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Карасева Е.С., Кисин А.Ю. (2023а) Минералогия, условия образования и

генезис агрегатов самородных и сульфидных минералов Полдневского месторождения демантоида (Средний Урал). *Геология рудных месторождений*, 65(6), 528–550. <https://doi.org/10.31857/S0016777023060060>

Мурзин В.В., Малич К.Н., Баданина И.Ю., Варламов Д.А., Чашухин И.С. (2023б) Минеральные ассоциации хромититов Алапаевского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал). *Литосфера*, 23(5), 740–765. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-740-765>.

Мурзин В.В., Сустанов С.Г., Мамин Н.А. (1999) Золотая и платиноидная минерализация россыпей Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал). Екатеринбург, УГГГА, 93 с.

Попова В.И., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А., Хворов П.В. (2022) Минералогия хромититов Поклонной горы Карабашского массива на Южном Урале. *Минералогия*, 8(22), 15–33. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-4-2>.

Чашухин И.С. (2019) О генетических типах дунитов в ультрамафитах складчатых областей (на примере Урала). *Известия УГГУ*, 2(54), 42–48. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-42-48>

Чашухин И.С., Булькин Л.Д., Чашухина В.А. (2005) О природе хромитового оруденения в породах дунит-клинопироксенитового комплекса офиолитов Среднего Урала / Ежегодник-2004, вып. 152. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 353–358.

Чашухин И.С., Мамина В.М., Сурганов А.В., Чашухина В.А., Булькин Л.Д., Гмыра В.Г. (2004) Закономерности состава акцессорной и рудообразующей шпинели в ультрамафитах Первомайского массива / Ежегодник-2003, вып. 151. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 206–217.

Airyants E.V., Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Belyanin D.K., Ochirov Y.C. (2022) Platinum-group minerals in the placer of the Kitoy River, East Sayan, Russia. *Minerals*, 12, 21. <https://doi.org/10.3390/min12010021>

Barkov A.Y., Shvedov G.I., Silyanov S.A., Martin R.F. (2018) Mineralogy of platinum-group elements and gold in the ophiolite-related placer of the River Bolshoy Khailyk, western Sayans, Russia. *Minerals*, 8, 247. <https://doi.org/10.3390/min8060247>

Cabri L.J., Oberthür T., Keays R.R. (2022) Origin and depositional history of platinum-group minerals in placers – a critical review of facts and fiction. *Ore Geology Reviews*, 144, 104733. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104733>

Farré-de-Pablo Júlia, Proenza J.A., González-Jiménez J.M., Aiglsperger T., Torró L., Domènech C., García-Casco A. (2022) Low-temperature hydrothermal Pt mineralization in uvarovite-bearing ophiolitic chromitites from the Dominican Republic. *Mineralium Deposita*, 57, 955–976. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01079-8>

Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinised and weathered chromitite of the Vourinos complex, Greece. *The Canadian Mineralogist*, 35, 611–626.

Kiseleva O., Airiyants E., Belyanin D., Zhmodik S. (2019) Hydrothermal remobilization of platinum group elements and their secondary minerals in chromitite deposits of the Eastern Sayan ophiolites (Russia). *E3S Web of Conferences*, 98, 08014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808014>

Kiseleva O., Airiyants E., Belyanin D., Zhmodik S. (2020) Podiform chromitites and PGE mineralization in the Ulan-Sar'dag ophiolite (East Sayan, Russia). *Minerals*, 10, 141. <https://doi.org/10.3390/min10020141>

McDonald A.M., Proenza J.A., Zaccarini F., Rudashevsky N.S., Cabri L.J., Stanley C.J., Rudashevsky V.N., Melgarejo J.C., Lewis J.F., Longo F., Bakker R.J. (2010) Garutiite, (Ni,Fe,Ir), a new hexagonal polymorph of native Ni from Loma Peguera, Dominican Republic. *European Journal of Mineralogy*, 22, 293–304. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-2007>

Zaccarini F., Economou-Eliopoulos M., Kiseleva O., Garuti G., Tsikouras B., Pushkarev E., Idrus A. (2022) Platinum group elements (PGE) geochemistry and mineralogy of low economic potential (Rh-Pt-Pd)-rich chromitites from ophiolite complexes. *Minerals*, 12, 1565. <https://doi.org/10.3390/min12121565>

Zaccarini F., Pushkarev E.V., Garuti G. (2008) Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia). *Ore Geology Reviews*, 33, 20–30. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.007>

## REFERENCES

Airyants E.V., Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Belyanin D.K., Ochirov Y.C. (2022) Platinum-group minerals in the placer of the Kitoy River, East Sayan, Russia. *Minerals*, 12, 21. <https://doi.org/10.3390/min12010021>

Barkov A.Y., Shvedov G.I., Silyanov S.A., Martin R.F. (2018) Mineralogy of platinum-group elements and gold in the ophiolite-related placer of the River Bolshoy Khailyk, western Sayans, Russia. *Minerals*, 8, 247. <https://doi.org/10.3390/min8060247>

Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Martin R.F., Tamura N., Chi Ma, Nikiforov A.A. (2022) Kuvaevite, Ir<sub>5</sub>Ni<sub>10</sub>S<sub>16</sub>, a new mineral species, its associations and genetic features, from the Sisim river placer zone, Eastern Sayans. *Russian Geology and Geophysics*, 63(12), 1373–1387. <https://doi.org/10.2113/RGG20224455>

Cabri L.J., Oberthür T., Keays R.R. (2022) Origin and depositional history of platinum-group minerals in placers – a critical review of facts and fiction. *Ore Geology Reviews*, 144, 104733. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104733>

Chashchukhin I.S. (2019) About genetic types of dunites in ultramafic rocks of fold areas (the Urals as example). *Izvestiya UGGU (News of the Ural State Mining University)*, 2(54), 42–48. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-42-48> (in Russian)

- Chashchukhin I. S., Bulykin L.D., Chashchukhina V.A. (2005) About the nature of chromite mineralization in rocks of the dunite-clinopyroxenite complex of ophiolites of the Middle Urals. In: *Ezhegodnik-2004, vypusk 152 Yearbook-2004 (Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS)*, is. 152). Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 353–358. (in Russian)
- Chashchukhin I.S., Mamina V.M., Surganov A.V., Chashchukhina V.A., Bulykin L.D., Gmyra V.G. (2004) Regularities of composition of accessory and ore-forming spinel in ultramafic rocks of the Pervomaisky massif. In: *Ezhegodnik-2003, vypusk 151 (Yearbook-2003 (Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS)*, is. 151). Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 206–217. (in Russian)
- Farré-de-Pablo J.Úlia, Proenza J.A., González-Jiménez J.M., Aiglsperger T., Torró L., Domènech C., Garcia-Casco A. (2022) Low-temperature hydrothermal Pt mineralization in uvarovite-bearing ophiolitic chromitites from the Dominican Republic. *Mineralium Deposita*, 57, 955–976. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01079-8>
- Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinised and weathered chromitite of the Vourinos complex, Greece. *The Canadian Mineralogist*, 35, 611–626.
- Kiseleva O., Airiyants E., Belyanin D., Zhmodik S. (2019) Hydrothermal remobilization of platinum group elements and their secondary minerals in chromitite deposits of the Eastern Sayan ophiolites (Russia). *E3S Web of Conferences*, 98, 08014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808014>
- Kiseleva O., Airiyants E., Belyanin D., Zhmodik S. (2020) Podiform chromitites and PGE mineralization in the Ulan-Sar'dag ophiolite (East Sayan, Russia). *Minerals*, 10, 141. <https://doi.org/10.3390/min10020141>
- McDonald A.M., Proenza J.A., Zaccarini F., Rudashevsky N.S., Cabri L.J., Stanley C.J., Rudashevsky V.N., Melgarejo J.C., Lewis J.F., Longo F., Bakker R.J. (2010) Garutiite, (Ni,Fe,Ir), a new hexagonal polymorph of native Ni from Loma Peguera, Dominican Republic. *European Journal of Mineralogy*, 22, 293–304. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-2007>
- Murzin V.V., Malitch K.N., Badanina I.Yu., Varlamov D.A., Chashchukhin I.S. (2023b) Mineral assemblages from chromitites of the Alapaevsk dunite-harzburgite massif (Middle Urals). *Litosfera (Lithosphere)*, 23(5), 740–765. (in Russian) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-740-765>
- Murzin V.V., Sustavov S.G., Mamin N.A. (1999) Gold and platinum-group element mineralization of placer deposits of the Verkh-Neiva massif of Alpine-type ultrabamafic rocks (Central Urals). Yekaterinburg, UGGGA, 93 p. (in Russian)
- Murzin V.V., Varlamov D.A., Karaseva E.S., Kisin A.Yu. (2023a) Mineralogy and conditions of formation genesis of aggregates of natural and sulfide minerals of the Poldnevskoe demantoid deposit (Middle Urals). *Geology of Ore Deposits*, 65(6), 544–566. <https://doi.org/10.1134/S1075701523060065>
- Popova V.I., Belogub E.V., Rassomakhin M.A., Popov V.A., Khvorov P.V. Mineralogy of chromitites of Mount Poklonnaya of the Karabash massif, South Urals. *Mineralogy (Russia)*, 8(4), 15–33 (In Russian)
- Shtenberg D.S., Chashchukhin I.S., Uimin S.G. (1990) The position of chromite mineralization in the history of the formation of alpine-type hyperbasites. *Geokhimiya rudnykh elementov v bazitakh i giperbazitakh. Kriterii prognoza*. Irkutsk, Institute of Geochemistry SB RAS, 166–170. (In Russian).
- Zaccarini F., Pushkarev E.V., Garuti G. (2008) Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia). *Ore Geology Reviews*, 33, 20–30. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.007>
- Zoloev K.K., Volchenko Ya.A., Koroteev V.A., Malakhov I.A., Mardirosoyan A.N., Khrypov V.N. (2001) Platinum-metal mineralization in geological complexes of the Urals. Yekaterinburg, UGSE, 199 p. (in Russian)

### Информация об авторах

Мурзин Валерий Васильевич – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; [murzin@igg.uran.ru](mailto:murzin@igg.uran.ru)

Малич Крешимир Ненадович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; [dunite@yandex.ru](mailto:dunite@yandex.ru)

Кисин Александр Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; [kissin@igg.uran.ru](mailto:kissin@igg.uran.ru)

### Information about the authors

Valery V. Murzin – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Key Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; [murzin@igg.uran.ru](mailto:murzin@igg.uran.ru)

Kreshimir N. Malitch – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Key Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; [dunite@yandex.ru](mailto:dunite@yandex.ru)

Aleksandr Yu. Kisin – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; [kissin@igg.uran.ru](mailto:kissin@igg.uran.ru)