

Минералы платиновой группы первичной ассоциации в россыпи р. Большой Сап (Средний Урал) и проблема индикаторного значения осмий-рутениевого тренда составов природных Os-Ir-Ru сплавов

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

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: murzin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 19.02.2024 г., принята к печати 06.02.2025 г.

Объект исследования. Первичные минералы платиновой группы из золотоносной россыпи р. Большой Сап (Средний Урал) в южном обрамлении Первомайского офиолитового массива. **Методы.** Для изучения химического состава минералов применена сканирующая электронная микроскопия (JEOL-JSM6390LV) и рентгено-спектральный микроанализ (Cameca SX 100). Изотопный состав серы зерен лаурита и эрликманита определен с помощью лазерной фемтосекундной системы абляции (NWR Femtosecond UC with laser Pharos 2mJ-200-PPam and harmonics module HE-4Ni-A) и масс-спектрометрического анализа (MAT-253 Thermo Fisher Scientific). **Результаты.** Выявлен широкий видовой состав первичных минералов платиновой группы, представленных самородными минералами систем Os-Ir-Ru (осмий, иридий, рутений, рутениридосмин) и Pt-Fe (по стехиометрии близкие к составу изоферроплатины), а также Ru-Os сульфидами (лаурит, эрликманит). Зерна иридия содержат ламели изоферроплатины, являющиеся продуктом распада твердого раствора, а также включения купроиридита, Ru-содержащего пентландита, кашинита, толовкита. Включения в изоферроплатине представлены бреггитом, сульфидами родия и палладия (Pd-Rh-S), Pd-содержащим (5.78 мас. % Pd) самородным золотом. Вариации состава гексагональных природных Os-Ir-Ru сплавов отражают наличие трех трендов – рутениевого, осмий-иридиевого и осмий-рутениевого. Значения изотопного состава серы зерен лаурита и эрликманита $((1.0–2.5) \pm 0.2\text{‰})$ указывают на субхондритовый источник серы, отражающий незначительный вклад коровой серы в результате процессов мантийно-корового взаимодействия. Проведен анализ распространенности первичных минералов платиновой группы в россыпях из различных платиноносных зон Среднего Урала. В западной Серовско-Невьянской зоне распространены Os-Ir-Ru сплавы осмий-иридиевого и рутениевого трендов, а также Pt-Fe минералы серии тетраферроплатина PtFe – туламинит $\text{PtFe}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}$ – ферроникельплатина $\text{PtFe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$. Os-Ir-Ru сплавы осмий-рутениевого тренда установлены только в восточных Салдинско-Сысертской и Алапаевской зонах. Os-Ir-Ru сплавы рутениевого и осмий-иридиевого трендов, самородный иридий и изоферроплатина распространены повсеместно. **Выводы.** Широкий видовой состав первичных минералов платиновой группы в россыпи обусловлен полигенной природой хромититов, проявленной в офиолитовых массивах Среднего Урала. Наиболее высокотемпературные Os-Ir-Ru сплавы осмий-иридиевого тренда, а также Os-Ru сульфиды связаны с латераль-секреционными хромититами в дунит-гарцбургитовом комплексе. Метасоматические и реакционно-метасоматические хромититы в дунит-верлит-клинопироксенитовом комплексе являются коренными источниками природных Os-Ir сплавов осмий-иридиевого тренда и Pt-Fe сплавов. Наиболее вероятной причиной возникновения осмий-рутениевого тренда химического состава природных гексагональных Os-Ir-Ru сплавов служит перекристаллизация первичных высокотемпературных твердых растворов при метаморфических преобразованиях в более низкотемпературных условиях и смене окислительного режима восстановительным.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, россыпи, тренды составов Os-Ir-Ru сплавов, изотопный состав серы, р. Большой Сап, Средний Урал

Источник финансирования

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

Для цитирования: Мурзин В.В., Малич К.Н., Кисин А.Ю. (2025) Минералы платиновой группы первичной ассоциации в россыпи р. Большой Сап (Средний Урал) и проблема индикаторного значения осмий-рутениевого тренда составов природных Os-Ir-Ru сплавов. *Литосфера*, **25**(5), 1142–1160. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-5-1142-1160>. EDN: HZSIQS

For citation: Murzin V.V., Malitch K.N., Kissin A.Yu. (2025) Primary platinum-group minerals in the placer of the Bol'shoi Sap River (Middle Urals) and the problem of the indicator value of the osmium-ruthenium trend for the compositions of natural hexagonal Os-Ir-Ru alloys. *Lithosphere (Russia)*, **25**(5), 1142–1160. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-5-1142-1160>. EDN: HZSIQS

Primary platinum-group minerals in the placer of the Bol'shoi Sap River (Middle Urals) and the problem of the indicator value of the osmium-ruthenium trend for the compositions of natural hexagonal Os-Ir-Ru alloys

Valery V. Murzin, Kreshimir N. Malitch, Alexander Yu. Kissin

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mail: murzin@igg.uran.ru

Received 19.02.2024, accepted 06.02.2025

Research subject. Primary platinum-group minerals from the gold placer of the Bolshoi Sap River (Middle Urals) in the southern frame of the Pervomaik ophiolite-type massif. **Methods.** The chemical composition of minerals was studied by scanning electron microscopy (JEOL-JSM6390LV) and electron microprobe analysis (Cameca SX 100). The sulfur isotopic composition of laurite and erlichmanite grains was determined using a laser femtosecond ablation system (NWR Femtosecond UC with laser Pharos 2mJ-200-PPam and harmonics module HE-4Hi-A) attached to a MAT-253 mass spectrometer (Thermo Fisher Scientific). **Results.** A wide species composition of primary platinum-group minerals was revealed, represented by native minerals of the Os-Ir-Ru (osmium, iridium, ruthenium, rutheniridosmine) and Pt-Fe (by stoichiometry close to the composition of isoferroplatinum) systems, as well as Ru-Os sulfides (laurite, erlichmanite). Iridium grains contain isoferroplatinum lamellae, which are a product of solid solution decomposition, as well as the inclusions of cuproiridsite, Ru-bearing pentlandite, kashinite, and tolovkite. Inclusions in isoferroplatinum are represented by braggite, rhodium and palladium sulfides (Pd-Rh-S), and Pd-bearing (5.78 wt % Pd) native gold. Variations in the composition of natural hexagonal Os-Ir-Ru alloys reflect the presence of three trends (i.e., ruthenium, osmium-iridium, and osmium-ruthenium). The sulfur isotopic values of laurite and erlichmanite grains ((1.0–2.5) ± 0.2‰) are consistent with derivation of sulfur from a sub-chondritic source, reflecting a minor contribution of crustal sulfur during mantle-crustal interaction processes. The prevalence of primary platinum-group minerals in placers from various platinum-bearing zones of the Middle Urals was analyzed. In the western Serov-Nevyansk zone, Os-Ir-Ru alloys of osmium-iridium and ruthenium trends are common, as well as Pt-Fe minerals of the tetraferroplatinum series PtFe – tulameenite PtFe_{0.5}Cu_{0.5} – ferronickelplatinum PtFe_{0.5}Ni_{0.5}. Os-Ir-Ru alloys of the osmium-ruthenium trend were established only in the eastern Salda-Sysert and Alapaevsk zones. Os-Ir-Ru alloys of ruthenium and osmium-iridium trends, native iridium and isoferroplatinum are widespread. **Conclusions.** The wide species composition of primary PGMs in the placer is due to the polygenic nature of chromitites, which is typical of ophiolite massifs in the Middle Urals. The high-temperature Os-Ir-Ru alloys of the ruthenium trend, as well as Os-Ru sulfides, are associated with laterally secreted chromitites in the dunite-harzburgite complex. Metasomatic and reactive metasomatic chromitites in the dunite-verlite-clinopyroxenite complex serve as sources of natural Os-Ir alloys of the osmium-iridium trend and Pt-Fe alloys. The highest temperature Os-Ir-Ru alloys of the ruthenium trend, as well as Os-Ru sulfides, are associated with lateral secretion chromitites in the dunite-harzburgite complex. Metasomatic and reaction-metasomatic chromitites in the dunite-wehrlite-clinopyroxenite complex serve as bedrock sources of natural Os-Ir alloys of the osmium-iridium trend, and Pt-Fe alloys. The most likely reason for the appearance of the osmium-ruthenium trend in the chemical composition of natural hexagonal Os-Ir-Ru alloys is the recrystallization of primary high-temperature solid solutions during metamorphic transformations at lower temperature conditions and the change of the oxidative regime to a reducing regime.

Keywords: platinum group minerals, placers, trends in Os-Ir-Ru alloy compositions, sulfur isotope composition, Bolshoi Sap River, Middle Urals

Funding information

This study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration No. 122022600107-1)

Acknowledgements

The authors express their gratitude to A.Zh. Kuznetsov and A.A. Alekseev for providing platinum-group mineral grains for this study.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно в хромититах офиолитовых базит-гипербазитовых массивов и связанных с ними россыпях выделяются первичные и вторичные ассоциации (парагенезисы) минералов платиновой группы (МПГ) (Prichard, Tarkian, 1988; Yang,

Seccombe, 1993; Malitch et al., 2001; Badanina et al., 2013, 2016; Малич и др., 2016; Zaccarini et al., 2016; Kiseleva, Zhmodik, 2017; Barkov et al., 2018; Kiseleva et al., 2020; Cabri et al., 2022; и др.). К первичным минералам обычно относят Os-Ir-Ru и Pt-Fe сплавы, а также сульфиды ряда лаурит-эрликманит. Вторичные минералы представлены последую-

щими их генерациями, а также многочисленными сульфидами, арсенидами, антимонидами, теллуридами ЭПГ, в составе которых часто присутствуют Cu, Ni и др. (см., например, (Cabri et al., 2022)). Среди вторичных минералов ранее мы предложили выделять “коррозионные” (псевдоморфные), которые замещают зерна первичных МПГ или “наложенные” новообразованные обрастающие эти зерна (Мурзин и др., 1999).

Настоящее исследование направлено на выявление особенностей состава МПГ из золотоносной россыпи р. Б. Сап, в которой МПГ ранее не изучали. Россыпь находится вблизи Первомайского гипербазитового массива в Салдинско-Сысертской платиноносной зоне (рис. 1). Среди МПГ в россыпи р. Б. Сап присутствуют как собственно зерна самородных Os-Ir-Ru и Pt-Fe минералов и Ru-Os сульфидов ряда лаурит-эрликманит, отнесенные к первичным МПГ, так и зональные зерна, сложенные первичными МПГ с оболочками вторичных ассоциаций МПГ коррозионного и наложенного парагенезисов. Вторичные МПГ охарактеризованы нами ранее (Мурзин и др., 2025) и представлены корродирующими первичные МПГ твердыми растворами серии руарсит-осарсит-ирарсит RuAsS-OsAsS-IrAsS , As-лауритом Ru(S,As)_2 (развиты по самородному рутению), As-содержащим эрликманитом Os(S,As)_2 , ирарситом IrAsS (развиты по рутениридосмину), Fe-содержащим иридием (Ir,Os,Fe), толовкитом IrSbS , ирарситом IrAsS (развиты по иридию). Наложенные МПГ представлены Fe-содержащими 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, Ru-содержащим кобальтпентландитом $(\text{Ni,Co})_9\text{S}_8$.

В данной статье мы ограничились описанием и анализом особенностей химического и изотопного состава МПГ первичной ассоциации, отражающих условия ранней истории формирования благороднометалльной минерализации. Дан анализ условий появления специфического осмий-рутениевого тренда составов природных Os-Ir-Ru сплавов, выделенного нами ранее (Мурзин и др., 2015) и проявленного в россыпи р. Б. Сап.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ РОССЫПИ ЗОЛОТА р. Б. САП

Река Б. Сап и приуроченные к ней долинные россыпи располагаются в западном обрамлении северной части Первомайского массива, дренируя вмещающие вулканогенно-осадочные породы, в которых заключены многочисленные мелкие линзовидные тела серпентинитов (рис. 2).

По данным И.С. Чашухина с соавторами (2004), Первомайский массив сложен преимущественно апогарцбургитовыми антигоритовыми и хризотил-лизардитовыми серпентинитами, залегаю-

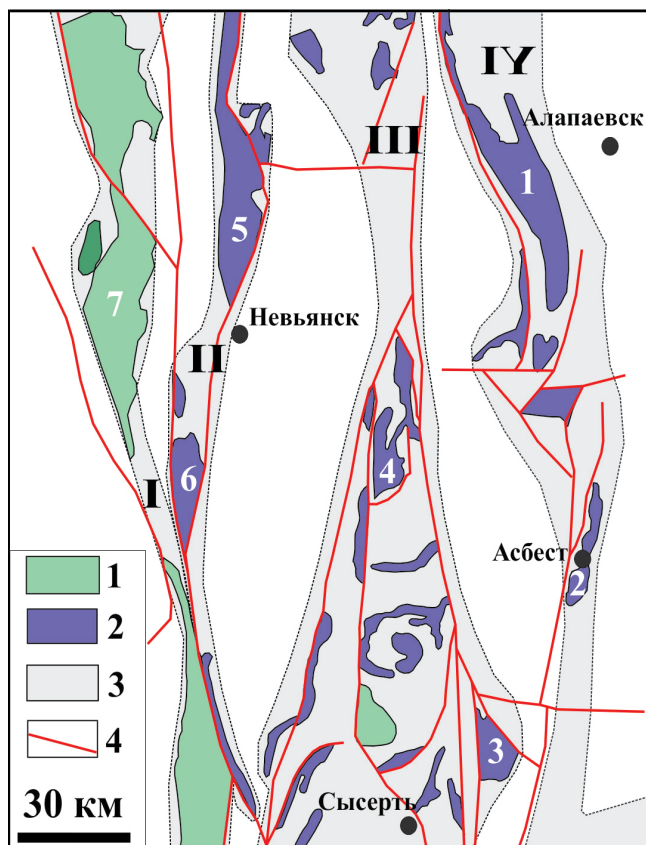


Рис. 1. Схема расположения платиноносных базит-гипербазитовых пород Среднего Урала на прогнозно-металлогенической карте платиноносных формаций (Золоев и др., 2001).

1 – дунит-клинопироксенит-габбровая ассоциация (ферроклинопироксенит-габбровый и дунит-клинопироксенит-тылаитовый комплексы Платиноносного пояса Урала), 2 – дунит-гарцбургитовая офиолитовая ассоциация (дунит-гарцбургитовый и краевой дунит-верлит-клинопироксенитовый комплексы), 3 – платиноносные зоны (I – Платиноносный пояс Урала, II – Серовско-Невьянская, III – Салдинско-Сысертская, IV – Алапаевская) и наиболее крупные массивы (1 – Алапаевский, 2 – Баженовский, 3 – Ключевской, 4 – Первомайский, 5 – Верхне-Тагильский, 6 – Верх-Нейвинский, 7 – Нижне-Тагильский), 4 – тектонические нарушения.

Fig. 1. Location scheme of platinum-bearing mafic-ultramafic rocks of the Middle Urals in the predictive-metallogenic map of platinum-bearing formations (Zoloev et al., 2001).

1 – dunite-clinopyroxenite-gabbro association (ferro-clinopyroxenite-gabbro and dunite-clinopyroxenite-tylaite complexes of the Platinum Belt of the Urals), 2 – dunite-harzburgite ophiolite association (dunite-harzburgite and marginal dunite-wehrilite-clinopyroxenite complexes), 3 – platinum-bearing zones (I – Platinum Belt of the Urals, II – Serov-Nevyansk, III – Salda-Sysert, IV – Alapaevsk) and the most large massifs (1 – Alapaevsk, 2 – Bazhenovsk, 3 – Klyuchevskoi, 4 – Pervomaisk, 5 – Verkhne-Tagil'sk, 6 – Verkh-Neyvinsk, 7 – Nizhne-Tagil'sk), 4 – faults.

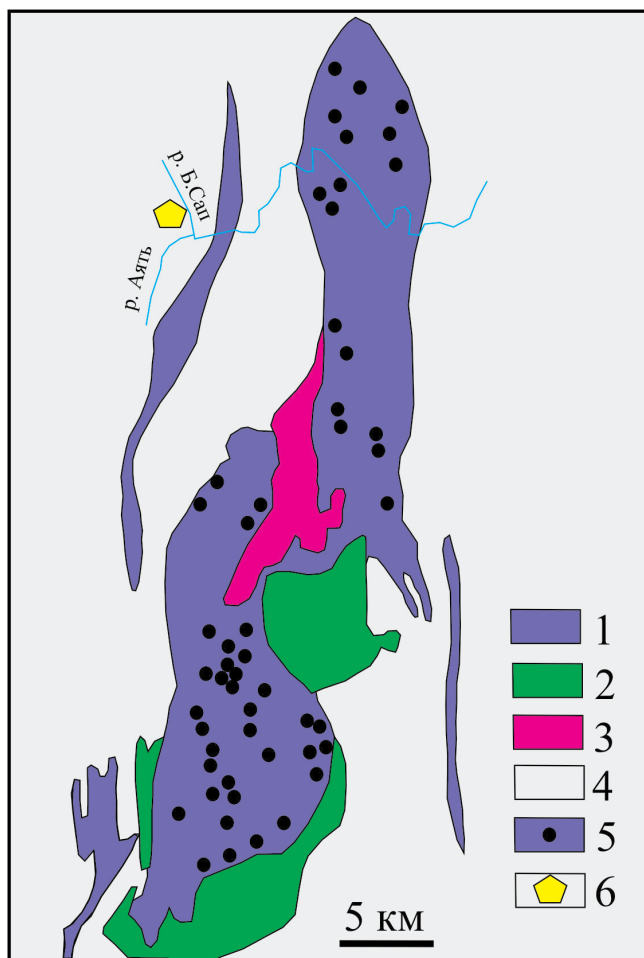


Рис. 2. Геологическая схема размещения месторождений и рудопроявлений хромитовых руд Первомайского массива, по (Чашухин и др., 2004).

1 – породы дунит-гарцбургитового комплекса и серпентиниты по ним, 2 – габброиды, 3 – гранитоиды, 4 – вулканогенно-осадочные породы окружения массива, 5 – хромитопроявления, 6 – положение россыпи р. Б. Сап.

Fig. 2. Geological scheme and location of chromite deposits and ore occurrences of the Pervomaiskiy massif according to (Chashchukhin et al., 2004).

1 – rocks of the dunite-harzburgite complex and serpentinites formed after them, 2 – gabbroic rocks, 3 – granitoids, 4 – volcanic-sedimentary rocks surrounding the massif, 5 – chromite manifestations, 6 – position of placer deposits of the Bol'shoi Sap River.

щими в вулканогенно-осадочных породах среднепалеозойского возраста (см. рис. 2). В северной части массива среди гарцбургитов развиты дуниты и аподунитовые серпентиниты, которые образуют субмеридионально вытянутые линзовидные тела длиной до 3 км. С юга гипербазиты окружены почти непрерывной полосой габбро, отделенного

от гарцбургитов породами дунит-верлит-клинопироксенитового комплекса. В среднюю часть массива внедрено тело гранитоидов протяженностью около 15 км, содержащее ксенолиты серпентинитов. Они разделяют 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).

Цепочка долинных россыпей по р. Б. Сап прослеживается от ее истоков до впадения в р. Аят на протяжении 20 км. Золотоносный пласт сложен песчано-глинистой массой с галькой и валунами порфиров и золотоносного кварца. Россыпи отрабатывались в прошлом столетии, а максимальная степень отработки приурочена к местам развития золотоносных жил. Изучавшиеся зерна МПГ извлечены из золотого концентрата, полученного при отработке техногенной части этой россыпи вблизи с. Аятское (координаты $57^{\circ}25'30.55''$ с. ш., $60^{\circ}39'18.81''$ в. д.). Зерна самородного золота в концентрате имеют различную крупность при преобладании размеров менее 1 мм и характеризуются степенью окатанности от слабой до сильной. Концентрат сложен рудными минералами черного шлиха: магнетитом, хромшпинелидом, ильменитом, самородным золотом и редкими зернами МПГ, циркона, рутила, лейкоксена, киновари.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения химического состава платиноидной минерализации применен комплекс методов ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург), включающий сканирующую электронную микроскопию (JEOL-JSM6390LV) и рентгено-спектральный микроанализ (Cameca SX 100). При проведении количественных анализов использованы следующие рентгеновские спектральные линии и стандартные образцы: OsMa, IrLa, RuLa, RhLa, PtLa, PdLb, NiKa (все чистые металлы), FeKa, CuKa, SKa (халькопирит), AsLa – сплав InAs; проведен учет спектральных наложений линий (RuLa на AsLa; RuLb 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.

Изотопный анализ серы минералов ряда лаурит-эрликманит выполнен в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Препарат для изотопного анализа представляет собой металлическую обойму с запрессованными в эпоксидную смолу девятью зернами лаурита и эрликманита. Анализ выполнен в центральной части каждого зерна. Изотопный состав серы зерен лаурита и эрликманита определен с по-

мощью лазерной фемтосекундной системы абляции (NWR Femtosecond UC with laser Pharos 2mJ-200-PPam and harmonics module HE-4Hi-A) и масс-спектрометрического анализа, детально охарактеризованного в работах (Ignatiev et al., 2018; Velivetskaya et al., 2019). Соотношение изотопов серы измеряли на массах $127 (^{32}\text{SF}^{5+})$ и $129 (^{34}\text{SF}^{5+})$ на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Fisher Scientific, Germany). Измерения проведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3. Результаты измерений $\delta^{34}\text{S}$ приведены относительно международного стандарта VCDT (Beaudoin et al., 1994) и выражены в промилле (‰). Точность анализов $\delta^{34}\text{S}$ составила ± 0.2 ‰ (2 σ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К первичным МПГ относятся зерна, принадлежащие к самородным и сульфидным минералам систем Os-Ir-Ru (осмий, иридий, рутений, рутениридосмин, лаурит, эрликманит) и Pt-Fe (по стехиометрии близкими к составу изоферроплатины). Размер зерен первичных МПГ в россыпи редко превышает 1 мм, обычно составляя десятые доли мм. В силу высокой твердости Os-Ir-Ru минералы практически не окатаны и сохраняют все детали микроскульптуры (рис. 3а–д). Напротив, зерна изоферроплатины окатаны в существенной степени. На их поверхности сохранены наиболее грубые отпечатки минералов породы в виде борозд и ямок, а также следы истирания (рис. 3е).

Зерна МПГ представлены преимущественно кристаллическими формами – изометричными, характерными для лаурита и осмия (см. рис. 3а, в), или уплощенными – для рутения и ирийдосмина (см. рис. 3г). Комковидные формы имеют зерна иридия, изоферроплатины, реже рутения. Морфология зерен изоферроплатины изометрично-комковидная или интерстициальная. На поверхности зерен осмия и эрликманита присутствуют ступеньки слоистого роста (см. рис. 3б, в) и отпечатков контактирующих с ними минералов. Срастания различных МПГ единичны (см. рис. 3г).

Химический состав самородных Os-Ir-Ru минералов приведен в табл. 1, в которой показаны наиболее типичные анализы, и на рис. 4а, на котором отражен состав всех проанализированных зерен. Диаграмма составов Os-Ir-Ru минералов показывает, что наиболее распространены зерна гексагональных осмия и рутения, а также кубического иридия. Анализы отдельных зерен находятся в поле рутениридосмина. Резко преобладающее число точек гексагональных сплавов на диаграмме локализуется в поле, относящемся к так называемому рутениевому тренду, т. е. в направлении увеличения содержания рутением Os-Ir сплавов (см.

рис. 4а). Ряд точек составов гексагональных сплавов располагается вдоль оси Os-Ru, аналогично ранее выделенному нами осмий-рутениевому тренду (Мурзин и др., 2015). Точки анализов кубического иридия формируют на диаграмме компактное поле. Постоянно присутствующими примесями в Os-Ir-Ru минералах являются Pt (до 4.8 мас. %) и Rh (до 2.4 мас. %) (см. табл. 1).

Распределение компонентов в изученных зернах самородных Os-Ir-Ru минералов, как правило, равномерно и лишь в единичных зернах фиксируется их зональное строение. Так, одно из зерен иридия содержит 8.5 мас. % Ru в центральной части, тогда как в краевой – только 1.5 мас. % (содержание осмия соответственно 27.7 и 33.2 мас. %) (рис. 5б). Некоторые зерна иридия содержат ламеллы минерала, отвечающего по составу изоферроплатине и являющегося продуктом распада твердого раствора (см. рис. 5в). В таких зернах, помимо изоферроплатины, встречены угловатые включения купроиридита, толовкита, Ru-содержащего пентландита, кашинита (см. табл. 4, ан. 1–4), а также толовкита (см. рис. 5г).

Os-Ir-Ru сульфиды слагают отдельные зерна (см. рис. 3а, б) или реже находятся в виде включений в иридии и рутениридосмине (см. рис. 5а). Они представлены полным рядом твердых растворов лаурит-эрликманит. При этом лаурит во включениях в зернах иридия и рутениридосмина наиболее богат рутением (см. рис. 4б). Содержание иридия в лауридах и эрликманитах не превышает 10 мас. % (табл. 2). В одном из зерен лаурита зафиксирована зональность, выраженная в присутствии локальной каймы этого же минерала с более высоким содержанием Ru и низким Os по сравнению с центральной частью зерна (см. рис. 5б).

Химический состав Pt-Fe минералов в виде как отдельных зерен, так и включений в иридии по стехиометрии близок к составу изоферроплатины. Основные примесные компоненты изоферроплатины – Pd, Rh, Cu (табл. 3). Минеральные включения в изоферроплатине представлены брэггитом (табл. 4, ан. 5) в срастании с сульфидами родия и палладия (см. рис. 5д), а также Pd-содержащим самородным золотом (см. рис. 5е). Состав самородного золота в срастании с брэггитом соответствует его медисто-палладистой разновидности, мас. %: 85.34 – Au, Ag – 7.01, Pd – 5.78, Cu – 2.01, сумма – 100.14. В некоторых зернах изоферроплатины присутствуют включения боуита (см. табл. 4, ан. 6–8).

Изотопный состав серы лаурита и эрликманита

Измеренные значения изотопного состава серы Ru-Os сульфидов ряда лаурит-эрликманит приведены в табл. 2. Значения $\delta^{34}\text{S}$ для Ru-Os сульфидов варьируются в пределах от 1.0 до 2.5‰ и харак-

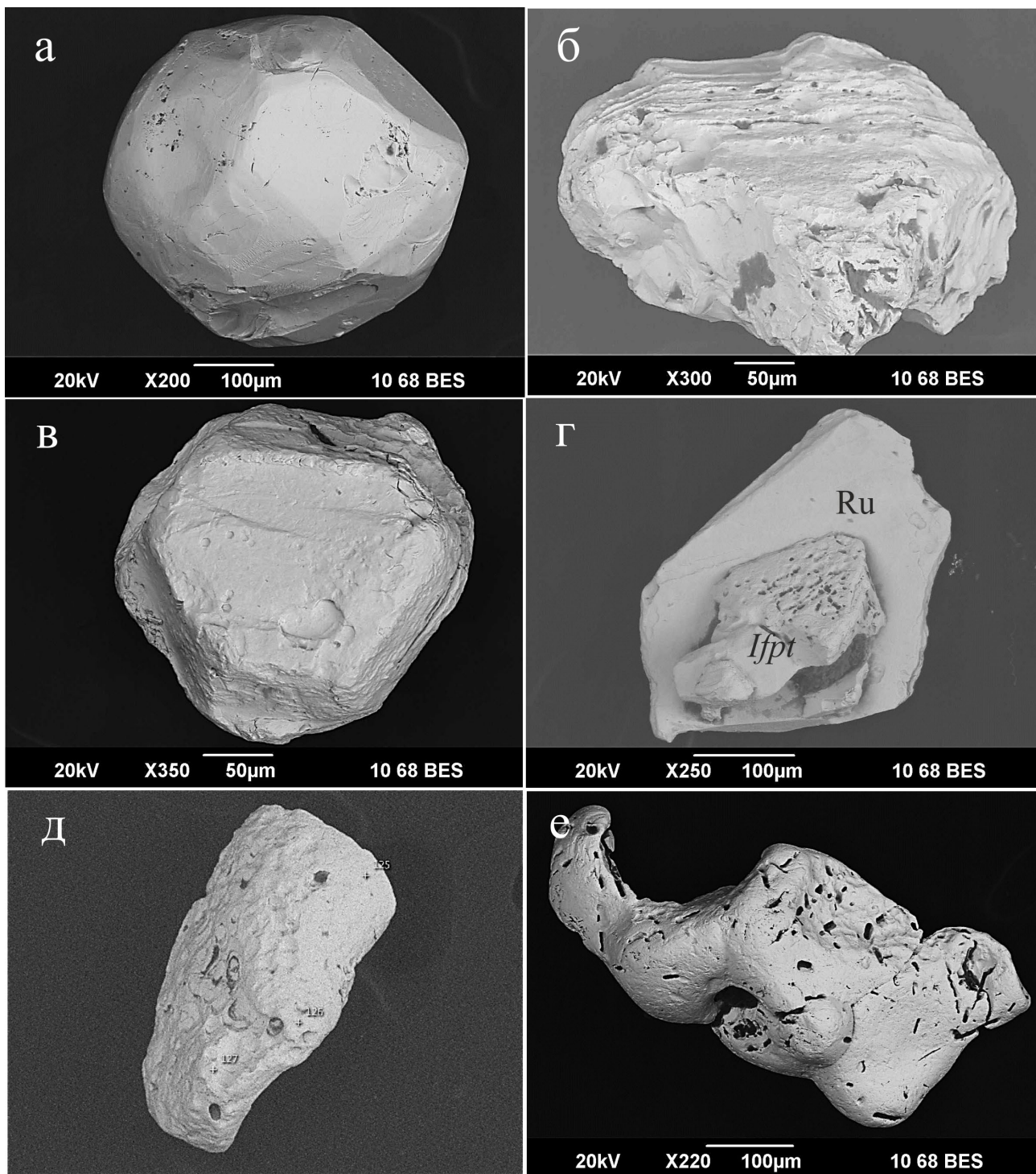


Рис. 3. Морфология типичных зерен первичной ассоциации.

а – кристалл лаурита, б – зерно эрликманита со ступеньками роста, в – кристалл осмия рутениевого тренда, г – сросток рутения рутениевого тренда с изоферроплатиной (*Ifpt*), д – зерно рутения осмий-рутениевого тренда, е – окатанное зерно изоферроплатины.

Fig. 3. Typical morphology of primary PGM grains.

а – laurite crystal, б – erlichmanite grain with growth steps, в – crystal of native osmium from ruthenium trend, г – native ruthenium from ruthenium trend intergrowth with isoferroplatinum (*Ifpt*), д – grain of native ruthenium from ruthenium trend, е – rounded grain of isoferroplatinum.

Таблица 1. Химический состав типичных зерен Os-Ir-Ru минералов первичной ассоциации, мас. %
Table 1. Representative analyses of primary Os-Ir-Ru alloys, wt %

№ п. п.	№ зерна	Os	Ir	Ru	Pt	Pd	Rh	Cu	Fe	Ni	Сумма
1	2-1	52.03	41.16	4.70	0.93	Н.п.о.	0.27	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	99.09
2	53	63.73	20.95	14.33	0.50	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	99.51
3	41-1	32.13	28.6	30.24	4.84	Н.п.о.	1.60	0.04	0.41	Н.п.о.	97.86
4	80-1	30.33	26.02	36.06	2.94	Н.п.о.	2.37	Н.п.о.	0.16	Н.п.о.	97.88
5	127	28.05	22.10	48.23	1.00	Н.п.о.	1.10	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	100.48
6	53-1	40.83	40.56	16.93	Н.п.о.	0.64	0.28	Н.п.о.	0.70	Н.п.о.	99.94
7	67	41.42	51.05	6.23	Н.п.о.	0.30	0.42	Н.п.о.	0.40	Н.п.о.	99.82
8	22-1	27.29	60.86	4.83	4.80	Н.п.о.	0.70	0.08	Н.п.о.	Н.п.о.	98.56
9	33-3	27.10	65.9	1.52	3.44	Н.п.о.	0.58	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	98.54
10	25-1	31.15	60.0	0.17	6.85	Н.п.о.	0.51	0.04	0.20	Н.п.о.	98.92
11	6-1	5.11	76.53	3.40	9.87	Н.п.о.	1.78	0.11	0.70	0.17	97.67
12	60-2	32.41	58.92	2.80	0.07	Н.п.о.	2.42	Н.п.о.	0.37	0.14	97.13

Примечание. Анализы: 1, 2 – осмий; 3–5 – рутений; 6, 7 – рутениридосмин; 8–12 – иридий, в том числе включение в лаурите (ан. 12). Здесь и в табл. 2–4 курсивом показаны определения в пределах двухсигмовой погрешности. Н. п. о. – содержание элемента ниже порога обнаружения (элемент не обнаружен).

Note. Analyses: 1, 2 – native osmium; 3–5 – native ruthenium; 6, 7 – rutheniridosmine; 8–12 – iridium, including inclusion in laurite (an. 12). Here and in Tables 2–4 italics show definitions within a two-sigma error. Н. п. о. – element was not detected.

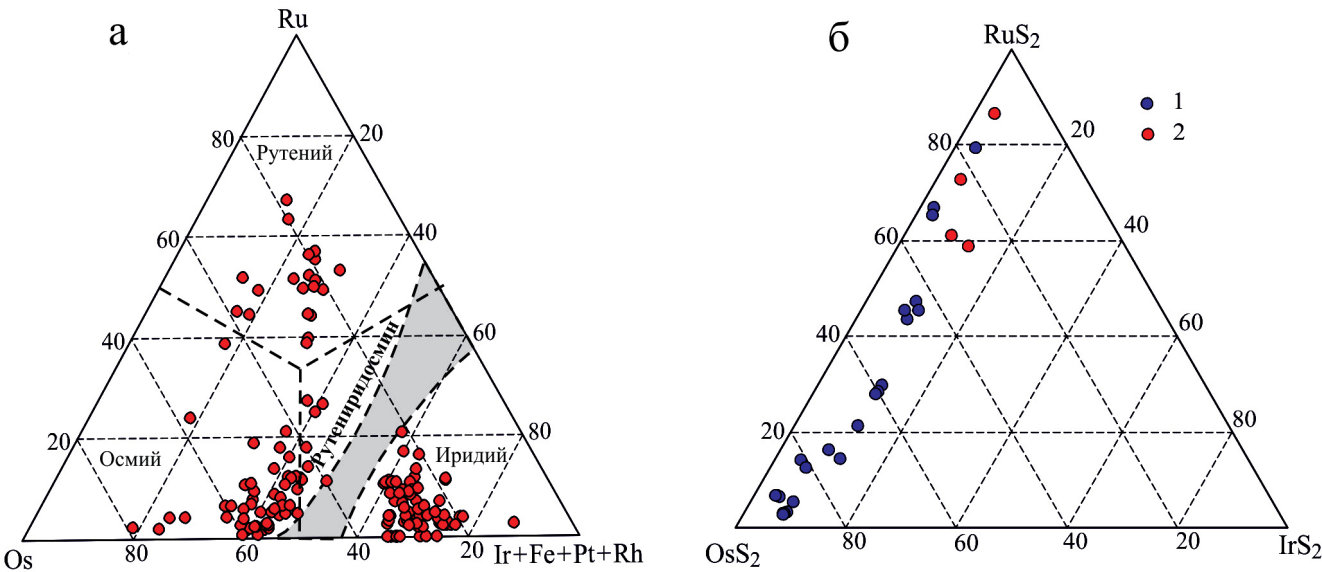


Рис. 4. Химический состав природных Os-Ir-Ru сплавов и Ru-Os сульфидов.
а – номенклатура и состав Os-Ir-Ru сплавов с полем несмесимости твердых растворов (серое), по (Harris, Cabri, 1991), в координатах Ru–Os–Ir, at. %; б – химический состав Ru-Os сульфидов ряда лаурит–эрликманит в виде самостоятельных кристаллов (1) и включений в иридии и рутениридосмине (2).

Fig. 4. Chemical composition of natural Os-Ir-Ru alloys and Ru-Os sulfides.
а – nomenclature and composition of Os-Ir-Ru alloys with the field of immiscibility (gray) after (Harris, Cabri, 1991) in coordinates Ru–Os–Ir, at. %; б – chemical composition of Ru-Os sulfides of the laurite–erlichmanite series forming solitary grains (1) and inclusions in iridium and rutheniridosmine (2).

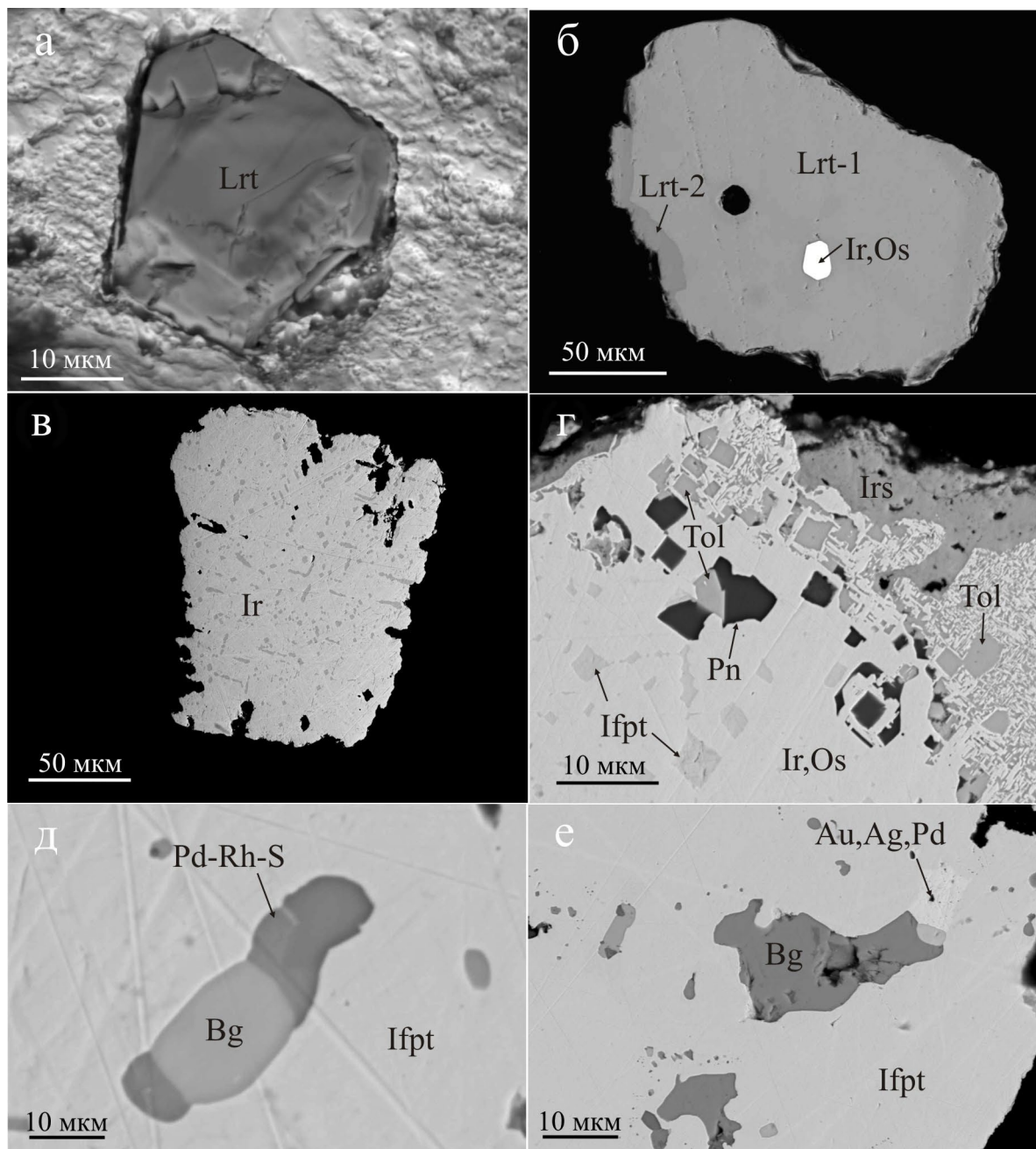


Рис. 5. Минеральные включения в Os-Ir-Ru минералах и изоферроплатине.

а – кристалл лаурита (*Lrt*) в зерне рутениридосмина; снимок поверхности зерна; б – зональное зерно лаурита-1 (*Lrt-1*) с локальной каймой лаурита-2 (*Lrt-2*) и включением кристалла иридия (*Ir,Os*) в его центральной части; в – ламели изоферроплатины (серая фаза) в зерне иридия (*Ir*); г – краевая часть зерна иридия (*Ir,Os*) с включениями изоферроплатины (*Ifpt*), Ru-содержащего пентландита (*Pn*) и толовкита (*Tol*) с зоной субграфики и внешней каймы ирарсита (*Irs*); д – полифазное включение брэггита с сульфидами родия и палладия (*Pd-Rh-S*) в изоферроплатине (*Ifpt*); е – сросток брэггита (*Bg*) и Pd-содержащего золота (*Au,Ag,Pd*) в изоферроплатине (*Ifpt*).

Fig. 5. Mineral inclusions in Os-Ir-Ru minerals and isoferroplatinum.

а – laurite crystal (*Lrt*) in a rutheniridosmine grain; photo of grain surface; б – a zoned grain of laurite-1 (*Lrt-1*) with a local rim of laurite-2 (*Lrt-2*) and an inclusion of an iridium crystal (*Ir,Os*) in its central part; в – isoferroplatinum lamellae (gray phase) native iridium (*Ir*); г – the marginal part of native iridium grain (*Ir,Os*) with inclusions of isoferroplatinum (*Ifpt*), Ru-bearing pentlandite (*Pn*) and tolovkite (*Tol*) with a subgraphic zone and an outer rim of irarsite (*Irs*); д – polyphase inclusion of braggite and Pd-Rh sulfide (*Pd-Rh-S*) in isoferroplatinum (*Ifpt*); е – intergrowth of braggite (*Bg*) and Pd-bearing gold (*Au,Ag,Pd*) in isoferroplatinum (*Ifpt*).

Таблица 2. Типичные анализы химического и изотопного состава серы Ru-Os сульфидов ряда лаурит-эрликманит, мас. %**Table 2.** Representative chemical and S-isotope analyses of laurite-erlichmanite series, wt %

№ п. п.	№ зерна	Ru	Os	Ir	Pt	Rh	Cu	Fe	S	Сумма	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, ‰
1	BS-22	30.76	28.78	8.21	0.31	0.23	Н.п.о.	Н.п.о.	33.51	101.80	-
2	BS-33	48.74	10.50	3.94	Н.п.о.	0.25	Н.п.о.	Н.о.	37.19	100.62	-
3	Pt-6	34.24	29.43	2.55	0.11	Н.п.о.	Н.п.о.	0.09	33.68	100.10	1.0
4	Pt-1	22.33	38.8	8.34	0.09	0.18	Н.п.о.	0.26	30.32	100.32	2.5
5	Pt-9	21.46	39.19	9.47	Н.п.о.	0.17	Н.п.о.	0.20	30.00	100.49	1.4
6	Pt-2	12.42	49.60	9.75	0.25	0.13	Н.п.о.	Н.п.о.	28.46	100.61	1.8
7	Pt-4	12.36	49.40	9.77	0.10	Н.п.о.	Н.п.о.	0.16	28.95	100.74	1.3
8	BS-81	8.96	53.39	9.39	0.14	0.10	0.07	Н.п.о.	28.25	100.30	-
9	Pt-5	5.88	56.86	9.11	Н.п.о.	0.09	Н.п.о.	Н.п.о.	27.91	99.85	1.9
10	Pt-10	2.56	67.11	3.67	Н.п.о.	0.10	Н.п.о.	0.07	26.30	99.81	1.5
11	Pt-3	2.11	64.71	5.85	0.52	0.53	Н.п.о.	0.17	26.62	100.51	2.4
12	Pt-11	1.22	67.71	5.60	0.20	Н.п.о.	0.05	Н.п.о.	25.51	100.29	1.8

Примечание. Анализы: 1, 2 – включения в сплавах Os-Ir-Ru, 3–12 – крупные кристаллы.

Note. Analyses: 1, 2 – inclusions in Os-Ir-Ru alloys, 3–12 – solitary grains.

Таблица 3. Химический состав природных Pt-Fe сплавов, мас. %**Table 3.** Representative analyses of natural Pt-Fe alloys, wt %

№ ан.	№ зерна	Pt	Pd	Ir	Rh	Os	Ru	Fe	Cu	Ni	Сумма
1	55-1	87.59	0.71	0.03	1.38	0.18	0.09	8.22	0.54	Н.п.о.	98.74
2	59-1	87.41	0.45	0.06	1.51	0.15	Н.п.о.	8.01	0.49	Н.п.о.	98.08
3	63-1	83.17	0.35	3.14	1.35	Н.п.о.	Н.п.о.	8.10	0.98	0.05	97.14
4	21-1	86.17	0.70	Н.п.о.	1.44	0.12	0.07	8.20	0.57	Н.п.о.	97.27
5	29-1	86.30	1.00	Н.п.о.	1.20	0.28	0.14	8.06	0.64	Н.п.о.	97.62
6	31-2	81.96	1.51	4.75	0.43	0.12	Н.п.о.	8.83	0.38	0.27	98.25
7	83-2	83.76	0.16	4.32	0.33	0.18	Н.п.о.	8.60	0.41	0.26	98.02
Кристаллохимические формулы (расчет на 1 ат.)											
1	$(\text{Pt}_{0.72}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.01})_{0.75}(\text{Fe}_{0.24}\text{Cu}_{0.01})_{0.25}$										
2	$(\text{Pt}_{0.73}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.01})_{0.76}(\text{Fe}_{0.23}\text{Cu}_{0.01})_{0.24}$										
3	$(\text{Pt}_{0.69}\text{Ir}_{0.03}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.01})_{0.75}(\text{Fe}_{0.23}\text{Cu}_{0.02})_{0.25}$										
4	$(\text{Pt}_{0.71}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.01})_{0.74}(\text{Fe}_{0.24}\text{Cu}_{0.02})_{0.26}$										
5	$(\text{Pt}_{0.71}\text{Rh}_{0.02}\text{Pd}_{0.02})_{0.75}(\text{Fe}_{0.23}\text{Cu}_{0.02})_{0.25}$										
6	$(\text{Pt}_{0.66}\text{Ir}_{0.04}\text{Pd}_{0.02})_{0.72}(\text{Fe}_{0.26}\text{Cu}_{0.01}\text{Ni}_{0.01})_{0.28}$										
7	$(\text{Pt}_{0.69}\text{Ir}_{0.04}\text{Rh}_{0.01})_{0.74}(\text{Fe}_{0.25}\text{Cu}_{0.01}\text{Ni}_{0.01})_{0.27}$										

Примечание. Анализы: 1–5 – гомогенные зерна; 6, 7 – включения и иридии.

Note. Analyses: 1–5 – homogeneous grains; 6, 7 – inclusions native iridium.

Таблица 4. Химический состав включений сульфидов в МПГ первичной ассоциации, мас. %

Table 4. Chemical composition of sulfide inclusions in PGMs of the primary assemblage, wt %

№ п. п.	№ зерна	Pt	Rh	Ir	Os	Ru	Pd	Fe	Cu	Ni	Co	S	Сумма
1	31-1	0.32	0.28	1.98	0.20	1.25	0.06	20.89	Н.п.о.	39.10	2.19	33.05	99.32
2	31-2	0.47	Н.п.о.	2.80	1.06	7.21	Н.п.о.	14.88	0.15	37.81	2.66	31.84	98.88
3	30-2	9.84	0.81	49.82	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	0.36	9.97	1.01	Н.п.о.	23.82	95.63
4	70-2	Н.п.о.	Н.п.о.	75.84	Н.п.о.	Н.п.о.	0.10	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	21.51	97.45
5	29-2	45.66	0.16	0.04	0.10	Н.п.о.	32.14	0.15	0.08	0.61	Н.п.о.	19.02	97.96
6	59-2	12.49	58.69	0.36	0.08	Н.п.о.	0.07	0.14	Н.п.о.	Н.п.о.	Н.п.о.	28.02	99.85
7	59-3	2.83	63.66	Н.п.о.	0.11	1.70	0.06	0.12	Н.п.о.	Н.п.о.	0.13	32.18	100.79
8	59-4	3.58	62.08	0.03	0.36	2.38	Н.п.о.	0.14	0.09	Н.п.о.	Н.п.о.	31.87	100.53
Кристаллохимические формулы													
1	$(\text{Fe}_{2.98} \text{Ni}_{5.30} \text{Co}_{0.30} \text{Ru}_{0.10} \text{Ir}_{0.08} \text{Rh}_{0.03} \text{Os}_{0.01} \text{Pt}_{0.01})_{8.81} \text{S}_{8.19}$ – Ru-содержащий пентландит												
2	$(\text{Fe}_{2.22} \text{Ni}_{5.36} \text{Ru}_{0.59} \text{Co}_{0.38} \text{Ir}_{0.12} \text{Os}_{0.05} \text{Pt}_{0.02})_{8.75} \text{S}_{8.25}$ – Ru-содержащий пентландит												
3	$(\text{Cu}_{0.89} \text{Ni}_{0.10} \text{Fe}_{0.04})_{1.03} (\text{Ir}_{1.46} \text{Pt}_{0.28} \text{Rh}_{0.04})_{1.78} \text{S}_{4.19}$ – купроиридсит												
4	$\text{Ir}_{1.86} \text{S}_{3.14}$ – кашинит												
5	$(\text{Pd}_{0.53} \text{Pt}_{0.41} \text{Ni}_{0.02})_{0.96} \text{S}_{1.04}$ – брэггит												
6	$(\text{Rh}_{1.89} \text{Pt}_{0.21} \text{Ir}_{0.01})_{2.11} \text{S}_{2.89}$ – боуит												
7	$(\text{Rh}_{1.87} \text{Ru}_{0.05} \text{Pt}_{0.04} \text{Fe}_{0.01} \text{Co}_{0.01})_{1.98} \text{S}_{3.02}$ – боуит												
8	$(\text{Rh}_{1.84} \text{Ru}_{0.07} \text{Pt}_{0.06} \text{Fe}_{0.01} \text{Os}_{0.01})_{1.98} \text{S}_{3.02}$ – боуит												

Примечание. Анализы: 1–4 – включения в иридии, 5–8 – включения в изоферроплатине.

Note. Analyses: 1–4 – inclusions in iridium, 5–8 – inclusions in isoferroplatinum.

теризуются средним значением $\delta^{34}\text{S} = 1.7\text{‰}$ ($n = 9$) при стандартном отклонении 0.5‰. При этом изотопный состав серы существенно не зависит от химического состава Ru-Os сульфидов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Если исходить из положения о генетической связи первичных МПГ с хромититами, то их разнообразие и особенности состава отдельных минералов могут быть обусловлены различным генезисом самих хромититов.

Генезис хромититов и связанных с ними МПГ

Согласно имеющимся представлениям, хромитовое оруденение, приуроченное к офиолитовым массивам Среднего Урала (см. рис. 1), является гетерогенным, что обусловлено различными соотношениями магматических и метасоматических процессов и различными геодинамическими обстановками (Чашухин и др., 2005; Чашухин, 2019). В частности, в этих работах показано, что

в Верх-Нейвинском массиве сохранены хромититы, связанные с породами дунит-гарцбургитового комплекса, в том числе кемпирсайского типа. Для кемпирсайского типа высокохромистого оруденения обоснован латераль-секреционный генезис, а само оно образовано в результате переотложения хрома из нижележащих непромышленных дунит-хромититовых серий пород под воздействием высокотемпературных восстановительных флюидов (Штейнберг и др., 1990; Чашухин и др., 1999; и др.). Связанные с хромититами кемпирсайского типа Os-Ir-Ru сплавы характеризуются рутениевым трендом вариаций состава (Melcher et al., 1997; Distler et al., 2008; и др.), в том числе в Верх-Нейвинском массиве (Мурзин и др., 1999). В южной и восточной частях Верх-Нейвинского массива породы дунит-гарцбургитового комплекса сменяются полосчатым дунит-верлит-клинопироксенитовым комплексом с редкими проявлениями хромититов, которые, предположительно, являются источниками МПГ Pt-Fe ассоциации (Мурзин и др., 1999), а также осмия и иридия Os-Ir тренда (Баданина и др., 2015).

В Ключевском и Первомайском массивах (см. рис. 1) широкое развитие получили метасоматические хромититы, связанные с локальной метаморфической дифференциацией вмещающих гарцбургитов с ранее сформированным латераль-секреционным оруденением (Чашухин и др., 2004, 2005). Метасоматические хромититы имеют глиноземистый состав и сформированы более окисленными флюидами. Наконец, в Первомайском массиве 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 ранним хромитовым оруденением (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 (месторождение Талицкое III) (Чашухин и др., 2004).

Ранее (Murzin et al., 2018) для Карабашского офиолитового массива на Южном Урале и локализованного в нем золотого оруденения в родингитах предложена декомпрессионная модель выжимаемой с глубины 60–70 км корово-мантийной смеси с участием восстановленных флюидов. Возможно, что с этих позиций следует искать объяснение особенностей МПГ Верх-Нейвинского массива. В противовес корово-мантийной смеси ультрабазиты Первомайского массива можно рассматривать как породы нижней коры, выжатые по зоне глубинного надвига и испытавшие прогрессивный метаморфизм в условиях не ниже амфиболитовой фации с последующим регрессивным метаморфизмом. Такая модель не противоречит представлениям о формировании кемпирсайского типа высокохромитового оруденения (Штейнберг и др., 1990; Чашухин и др., 1999; и др.) и метасоматических хромититов локальной метаморфической дифференциации гарцбургитов (Чашухин и др., 2004, 2005).

Распространенность первичных МПГ в россыпях Среднего Урала

Имеющиеся в нашем распоряжении, а также литературные данные о МПГ в россыпях и коренных хромититах указывают на их различную распространенность на Среднем Урале. Наиболее широко распространены Ru-Os сульфиды, кристаллы которых образуют включения в хромшпинелиде в Верх-Нейвинском и Алапаевском массивах (Zaccarini et al., 2016; Мурзин и др., 2023), а в россыпях встречаются в виде самостоятельных зерен или в виде включений в зернах самородных Os-Ir-Ru и Pt-Fe сплавов. Химический состав Os-Ru сульфидов россыпи р. Б. Сап, как показано выше, охватывает все промежуточные члены ряда

лаурит-эрликманит, однако включения их в зернах рутениридосмина и иридия имеют наиболее рутенистый состав и принадлежат только к лауриту (см. рис. 4б). Полный ряд составов минералов ряда лаурит-эрликманит характерен также для россыпи р. Восточный Шишим Верх-Нейвинского массива (Malitch et al., 2021). В Алабашской и Глинской россыпях самостоятельные зерна лаурита и эрликманита нами не обнаружены, однако зафиксированы редкие включения лаурита в осмии Os-Ru тренда.

Различия в составе МПГ в россыпях Среднего Урала устанавливаются также по минералам Pt-Fe ассоциации. Кубические Pt-Fe сплавы первичной ассоциации, близкие по составу к изоферроплатине Pt_3Fe , доминируют повсеместно. Тетрагональные же сплавы (тетраферроплатина PtFe, туламинит Pt_2FeCu , ферроникельплатина Pt_2FeNi) установлены только в россыпях массивов западного пояса, наиболее представительно в Верх-Нейвинском массиве (Мурзин и др., 2019б).

Изменчивость состава Os-Ir-Ru сплавов из различных массивов Среднего Урала показана на рис. 6. На нем отражено наличие широтной зональности состава гексагональных осмия и рутения, в то время как кубический иридий развит повсеместно. В западной Серовско-Невьянской зоне (Верх-Нейвинский, Восточно-Тагильский массивы) проявлены осмий-иридиевый и рутениевый тренды, а в расположенных к востоку от нее Салдинско-Сысертской и Алапаевской зонах, помимо этих трендов, проявлен осмий-рутениевый тренд.

Индикаторное значение осмий-рутениевого тренда составов природных гексагональных Os-Ir-Ru сплавов

Вопрос об индикаторном значении Os-Ru тренда составов природных гексагональных Os-Ir-Ru сплавов, выделенного нами ранее в Нижнеалабашской россыпи на Среднем Урале (Мурзин и др., 2015) и проявленного в россыпи р. Б. Сап, до настоящего времени остается нерешенным. Анализ литературных данных показывает, что составы Os-Ir-Ru сплавов, отвечающих осмий-рутениевому тренду, отмечаются достаточно редко (Hagen et al., 1990; Cabri et al., 2022; Oberthür et al., 2016). Они приводились для отдельных зерен из золотоносных россыпей Северной Бирмы и Германии (р. Рейн) (рис. 7). Источником МПГ этих россыпей, предположительно, являются офиолитовые массивы. Отдельные точки отмечались также среди МПГ элювиальных отложений в Сьерра-Леоне (коренной источник расслоенный комплекс Free-town), россыпей Канады (коренной источник неизвестен) и даже Урала (в районах г. Сысерти и г. Невьянска) (Cabri et al., 1996). Причины появления составов осмий-рутениевого тренда не обсуждались, или большой разброс точек составов осмия и ру-

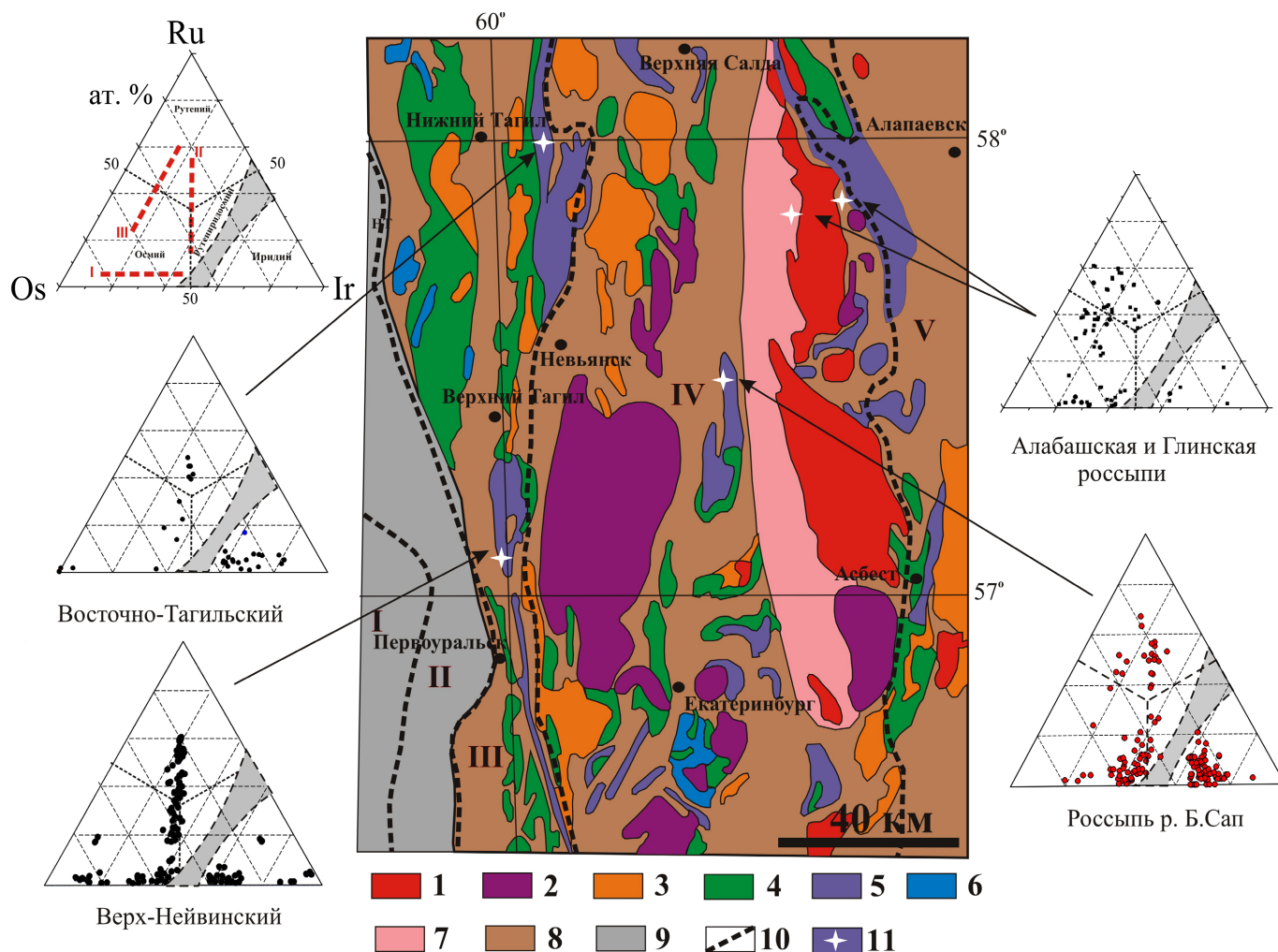


Рис. 6. Тектоническая схема Среднего Урала и положение на ней дунит-гарцбургитовых массивов (на основе Тектонической карты Урала м-ба 1:1 000 000, 1983 г.).

1–6 – формации интрузивных образований: 1 – гранитная (граниты, гранодиориты, аляскииты), 2 – гранодиоритовая (гранодиориты, тоналиты, граниты), 3 – плагиигранитовая (плагииграниты, кварцевые диориты), 4 – габбровая (габбро, габбро-нориты, габбро-диориты, диориты), 5 – дунит-гарцбургитовая (дуниты, гарцбургиты, серпентиниты), 6 – дунит-клинопироксенитовая (дуниты, верлиты, клинопироксениты, горнблендиты); 7 – породы амфиболитовой, амфиболито-гнейсовой, гнейсовой и мигматитовой ассоциаций; 8 – вулканогенно-осадочные породы островодужного сектора Урала; 9 – флишевые, флишеидные, молассовые, терригенно-карбонатные и карбонатные формации континентального сектора Урала; 10 – границы мегазон (I – Западно-Уральская, II – Центрально-Уральская, III – Тагило-Магнитогорская, IV – Восточно-Уральская, V – Зауральская); 11 – местонахождение образцов. На диаграммах Ru–Os–Ir показаны составы природных Os–Ir–Ru сплавов и их тренды (I – осмий-иридиевый, II – рутениевый, III – осмий-рутениевый) в россыпях различных массивов Среднего Урала (Мурзин и др., 1999; 2015; Некрасова и др., 2015).

Fig. 6. Tectonic scheme of the Middle Urals and locations of dunite-harzburgite massifs (modified after The tectonic map of the Urals on a scale 1:1 000 000, 1983).

1–6 – intrusive formations: 1 – granitic (granite, granodiorite, alaskite), 2 – granodiorite (granodiorite, tonalite, granite), 3 – plagiogranite (plagiogranite, quartz diorite); 4 – gabbro (gabbro, gabbro-norite, diorite), 5 – dunite-harzburgite (dunite, harzburgite, serpentinite); 6 – dunite-clinopyroxenite (dunite, wehrlite, clinopyroxenite, hornblende); 7 – rocks of the amphibolite, amphibolite-gneiss, gneiss, and migmatite associations; 8 – volcanogenic-sedimentary rocks of the island arc sector of the Urals; 9 – flysch, flyschoid, molasse, and terrigenous-carbonate, and carbonate formations of the continental sector of the Urals; 10 – boundaries of megazones (I – Western Urals, II – Central Urals, III – Tagil-Magnitogorsk, IV – Eastern Urals, V – Transurals), 11 – sampling locations. The Ru–Os–Ir diagrams show the compositions of natural Os–Ir–Ru alloys and their trends (I – osmium-iridium, II – ruthenium, III – osmium-ruthenium) in placers of various massifs of the Middle Urals (Murzin et al., 1999; 2015; Nekrasova et al., 2015).

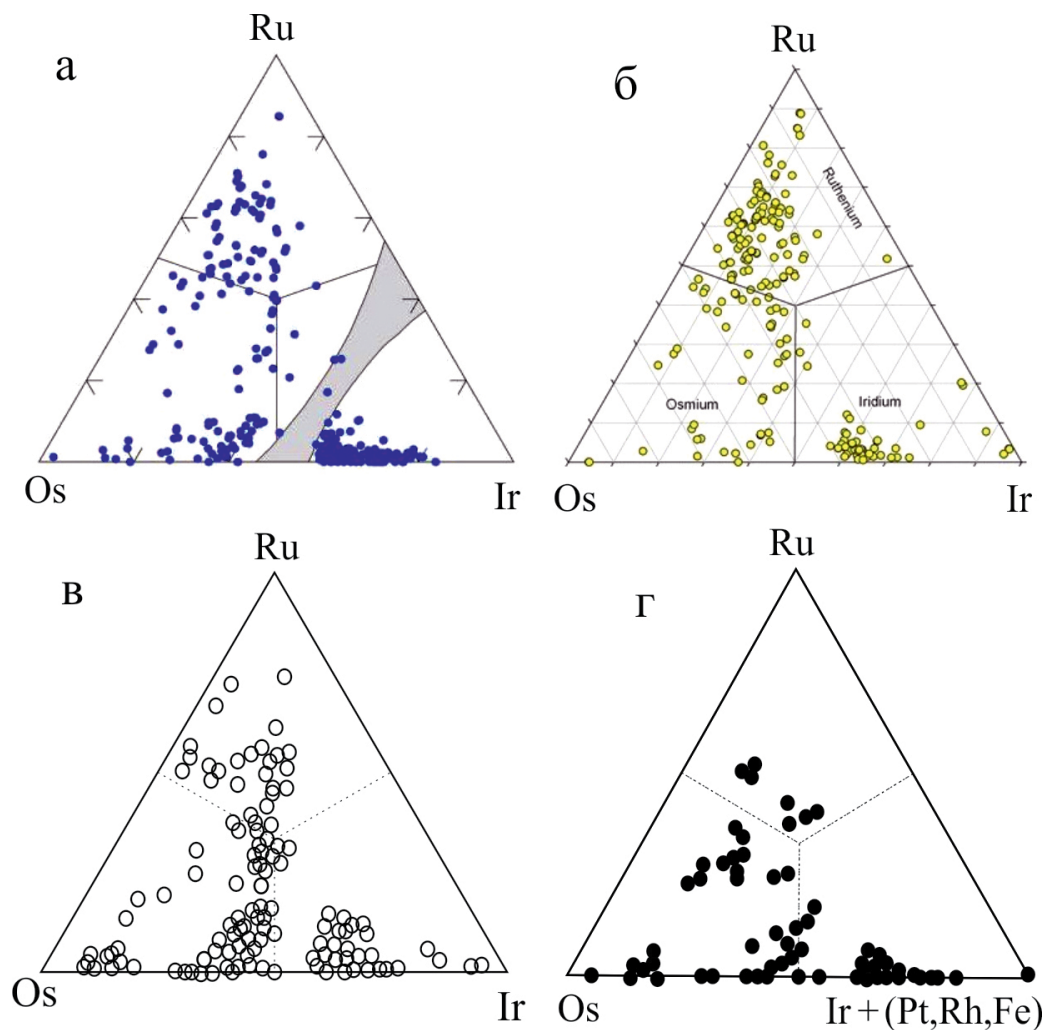


Рис. 7. Состав Os-Ir-Ru минералов из золотоносных россыпей, связанных с породами стратифицированно-го комплекса в Сьерра-Леоне (Cabri et al., 2022) (а), с породами офиолитовых массивов Германии (р. Рейн) (Oberthür et al., 2016) (б), Западных Саян (рр. Большой Хайлык, Золотая) (Barkov et al., 2018) (в), Корякии (Сидоров, 2009) (г).

Fig 7. Composition of Os-Ir-Ru minerals from gold placers associated (a) with rocks of the stratified complex in Sierra Leone (Cabri et al., 2022), with rocks of ophiolite-type massifs in (б) Germany (Rhine River) (Oberthür et al., 2016), Western Sayans (в; the Bolshoy Khailyk and Zolotaya rivers) (Barkov et al., 2018), Koryakia (г) (Sidorov, 2009).

тения объяснялся тем, что набор тяжелых минералов, включая МПГ, мог неоднократно подвергаться переработке в течение своей геологической истории (Oberthür et al., 2016).

Примеры появления Os-Ru тренда гексагональных Os-Ir-Ru минералов в России также имеются. В частности, он отмечен в золотоносной россыпи р. Большой Хайлык (Западные Саяны) в пределах Автовраковского офиолитового массива (Barkov et al., 2018) (см. рис. 7в). Причины появления этого тренда не обсуждаются.

Осмий-рутениевый тренд Os-Ir-Ru минералов также отчетливо проявлен в россыпях Северо-за-

падного офиолитового пояса п-ова Валижген в Корякско-Камчатском регионе (Осипенко и др., 2002; Сидоров, 2009) (см. рис. 7г). В этом регионе выделяются четыре офиолитовых пояса, однако Os-Ru тренд отмечен только в одном из них. Авторы указывают, что в этом поясе типичный для реститовых офиолитов рутениевый тренд слабо выражен, а для самих зерен гексагональных Os-Ir-Ru минералов характерно зональное строение с обогащением их краевых частей рутением, свидетельствующее о неравновесных условиях образования. Такие условия, по мнению авторов, могут реализовываться в дунит-ортопироксенит-хромитовую ста-

дию в условиях относительно пониженных давлений и повышенной фугитивности кислорода (Осипенко и др., 2002).

В коренных породах осмий-рутениевый тренд гексагональных Os-Ir-Ru минералов проявлен в хромититах протерозойского Оспиного-Китойского офиолитового массива в Восточных Саянах (рис. 8). Этот тренд авторами не выделяется и не обсуждается.

Как показывает приведенный выше обзор, возможные причины появления Os-Ru тренда гексагональных Os-Ir-Ru минералов авторами не обсуждаются или этот тренд связывают с эпигенетическими преобразованиями зерен первичного состава. Здесь уместно отметить, что в ряде работ (Рудашевский и др., 1999; Garuti, Zaccarini, 1997; González-Jiménez et al., 2015; Bai et al., 2000; Малич и др., 2016; и др.) указывается на сходство соотношений Ru, Os и Ir в самородных сплавах осмий-рутениевого тренда и сульфидных минералах ряда лаурит-эрликманит и возможность образования сплавов при десульфуризации сульфидов в процессах водного метаморфизма. Однако продукты десульфуризации лаурита и эрликманита, которые обычно представлены тонкодисперсными, пористыми агрегатами самородных фаз, обогащенных примесями Fe, Ni, Cu и Cr, и сохраняющими исходные соотношения Ru, Os и Ir, в россыпи р. Б. Сап не зафиксированы.

Одной из возможных причин появления осмий-рутениевого трендов химического состава осмидов могут быть последствия высокотемпературных метаморфических преобразований первичных гексагональных Os-Ir-Ru твердых растворов. Температура этих преобразований (пластические деформации – частичное растворение – рекристаллизация) оценена в 750–900°C (Жерновский, Мочалов, 1999). Этот диапазон температур отвечает также смене окислительных условий образования самородных МПГ на восстановительные (Кадик и др., 1993; Баданина и др., 2015).

Установлено (Кадик и др., 1993), что значения собственной летучести кислорода природных Os-Ir-Ru и Pt-Fe сплавов при высоких температурах (более 900°C) находятся выше буферного равновесия вюстит–железо, а при более низких температурах – ниже этого равновесия, т. е. высокотемпературные сплавы устойчивы в более окислительных условиях, нежели низкотемпературные. Как следствие в работе (Кадик и др., 1993) высказано предположение об образовании Pt-Fe сплавов при более низких температурах, нежели не содержащих железо Os-Ir-Ru сплавов. Более того, на примере зерен Os-Ir-Ru сплавов из россыпи Верх-Нейвинского массива установлены различия значений собственной летучести кислорода рутения по сравнению с осмием и иридием (Баданина и др., 2015). Эти эксперименты показали, что если при

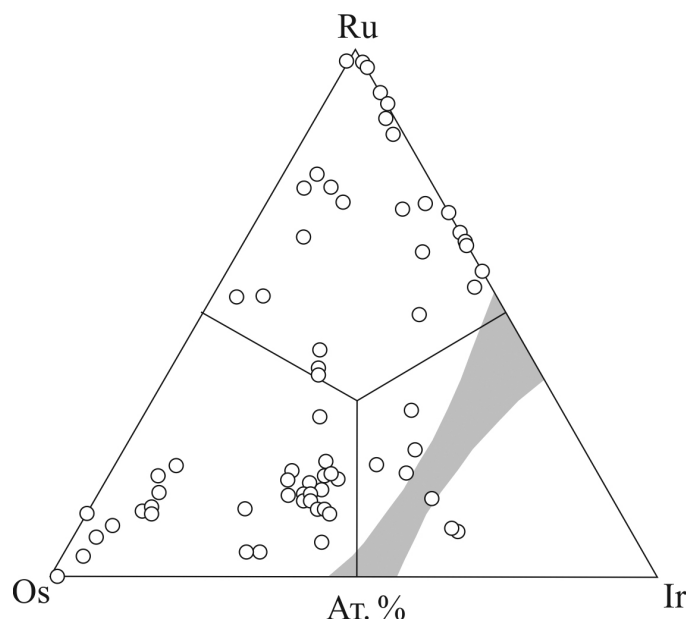


Рис. 8. Состав Os-Ir-Ru сплавов из хромитовых тел Оспиного-Китойского офиолитового массива (Киселева и др., 2022).

Fig. 8. Composition of Os-Ir-Ru alloys from chromite bodies of the Ospino-Kitoy ophiolite massif (Kiseleva et al., 2022).

высоких температурах (>1000°C) собственная фугитивность кислорода зерен рутения отвечает полю устойчивости вюстита, а осмия и иридия – магнетита, то при 800–900°C рутений находится в поле устойчивости железа, а осмий и иридий – в поле вюстита.

Коренные источники МПГ

Приведенные выше данные по собственной летучести кислорода, указывающие на различные температурные и окислительно-восстановительные условия устойчивости рутения, с одной стороны, и осмия, иридия, с другой, дают основание для предположения, что образование этих минералов происходит в различных обстановках. В частности, указано (Баданина и др., 2015), что минералы рутения типичны для мантийных пород дунит-гарцбургитового комплекса, тогда как коренным источником минералов осмия и иридия является более поздний полосчатый дунит-клинопироксенит-габбровый комплекс, расположенный над мантийными перидотитами (Баданина и др., 2015).

Нам представляется, что наиболее высокотемпературные минералы, представленные рутением и включениями в нем лаурита, а также минералы ряда лаурит-эрликманит, присутствующие

щие в россыпях в виде укрупненных кристаллов, связаны с латераль-секреционными хромититами в породах дунит-гарцбургитового комплекса. Этот тип хромититов максимально распространен в Верх-Нейвинском массиве. Данные изотопного состава серы первичных лаурита и эрликманита из россыпей р. Б. Сап в нашем исследовании ($\delta^{34}\text{S} = 1.7 \pm 0.5$) близки в пределах соответствующих погрешностей таковым Ru-Os сульфидов Верх-Нейвинского массива ($\delta^{34}\text{S} = 1.3 \pm 0.7\text{‰}$ (Мурзин и др., 2019а), $\delta^{34}\text{S} = 2.0 \pm 0.9\text{‰}$ (Malitch et al., 2021)), а также идентичны таковым в Ru-Os сульфидов из россыпей Борнео ($\delta^{34}\text{S} = 1.2 \pm 0.4\text{‰}$ (Nattori et al., 2004)). Во всех случаях Ru-Os сульфиды пространственно связаны с мантийными разрезами дунит-гарцбургитовых массивов офиолитовой ассоциации и близки значению $\delta^{34}\text{S}$ мантии Земли (Thode et al., 1961; Cartigny et al., 2009), что согласуется с предположением о мантийном источнике серы. Анализ данных по изотопному составу серы лауритов и эрликманитов, а также изотопному составу осмия Os-Ir-Ru сплавов и Ru-Os сульфидов Верх-Нейвинского массива свидетельствует о незначительном вкладе коровых источников в результате процессов мантийно-корового взаимодействия (Malitch et al., 2021).

Породы дунит-верлит-клинопироксенитового комплекса и связанные с ними метасоматические и реакционно-метасоматические хромититы служат источниками Os-Ir сплавов иридиевого тренда, образованных при повышенных температурах и фугитивности кислорода. Метасоматические хромититы являются также коренным источником Pt-Fe сплавов, образованных при пониженных значениях температуры и фугитивности кислорода. Установлено, что хромшпинелид в сростании с железистой платиной в Алабашской россыпи отвечает по составу рудному хромшпинелиду метасоматического генетического типа (Мурзин и др., 2015).

В пределах отдельных массивов коренные источники первичных Pt-Fe и Os-Ir-Ru сплавов, повидимому, разобщены в пространстве. При этом Os-Ir-Ru сплавы по отношению к Pt-Fe локализованы в породах, более проницаемых для эпигенетических флюидов, из которых отлагаются вторичные МПГ. В частности, в россыпи р. Б. Сап вторичные МПГ наблюдаются только в зернах Os-Ir-Ru сплавов, в то время как факты коррозии или обрастания зерен Pt-Fe сплавов вторичными МПГ не зафиксированы (Мурзин и др., 2025).

Зерна осмия и рутения осмий-рутениевого тренда максимально развиты в Нижне-Алабашской и Глинской россыпях. В этих россыпях самостоятельные укрупненные кристаллические зерна первичных лаурита и эрликманита не обнаружены, хотя лаурит присутствует в виде включений в осмии и рутении. Присутствие вторичных МПГ на зернах Os-Ir-Ru сплавов, в том числе осмий-ру-

тениевого тренда, также не зафиксировано. Мы предполагаем, что коренными источниками МПГ осмий-рутениевого тренда являются мелкие тела ультрабазитов среди гранитогнейсов Мурзинского массива метасоматически преобразованных при становлении последних (Мурзин и др., 2015).

ВЫВОДЫ

1. Полигенная природа хромититов обусловила совмещение в россыпи р. Б. Сап широкого видового состава МПГ. Среди них к первичным относятся зерна, принадлежащие к самородным и сульфидным минералам систем Os-Ir-Ru (осмий, иридий, рутений, рутениридосмин, лаурит, эрликманит) и Pt-Fe (по составу близкие к изоферроплатине). Вариации состава гексагональных Os-Ir-Ru сплавов отражают наличие трех трендов – рутениевого, осмий-иридиевого и осмий-рутениевого. Зерна иридия содержат ламели изоферроплатины, являющиеся продуктом распада твердого раствора, а также включения купроиридита, толовкита, Ru-содержащего пентландита, кашинита, толовкита. Включения в изоферроплатине представлены брэггитом, сульфидами родия и палладия (Pd-Rh-S), Pd-содержащим самородным золотом.

2. В россыпях Среднего Урала проявлена широтная зональность распространенности первичных МПГ и состава Os-Ir-Ru сплавов. В россыпях западной Серовско-Невьянской платиноносной зоны присутствуют Os-Ir-Ru сплавы осмий-иридиевого и рутениевого трендов, а также Pt-Fe тетрагональные минералы (тетраферроплатина PtFe, туламинит $\text{PtFe}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}$, ферроникельплатина $\text{PtFe}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$). Os-Ir-Ru сплавы осмий-рутениевого тренда установлены только в восточных Салдинско-Сысертской и Алапаевской зонах. Os-Ir-Ru сплавы рутениевого и иридиевого трендов, кубический иридий и изоферроплатина распространены повсеместно.

3. Наиболее вероятной причиной возникновения осмий-рутениевого тренда химического состава гексагональных Os-Ir-Ru сплавов является перекристаллизация первичных высокотемпературных твердых растворов при метаморфических преобразованиях в более низкотемпературных условиях и смене окислительного режима восстановительным. Перекристаллизованные Os-Ir-Ru сплавы с составами, отвечающими осмий-рутениевому тренду, будут относиться ко вторичным по отношению к последовательности образования МПГ в хромититах.

4. Анализ имеющихся представлений о генезисе хромититов и особенностей состава гексагональных Os-Ir-Ru сплавов на Среднем Урале показывает, что наиболее высокотемпературные сплавы рутениевого тренда, а также Os-Ru сульфиды связаны с латераль-секреционными хромититами в ду-

нит-гарцбургитовом комплексе. Метасоматические и реакционно-метасоматические хромититы в дунит-верлит-клинопироксенитовом комплексе являются коренными источниками Os-Ir сплавов иридиевого тренда и Pt-Fe сплавов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Ж. Кузнецову и А.А. Алексееву за предоставление зерен МПГ для проведения исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баданина И.Ю., Жаркова Е.В., Кадик А.А., Малич К.Н., Мурзин В.В. (2015) Результаты экспериментального определения собственной летучести кислорода Ru-Os-Ir сплавов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, Средний Урал (Россия). *Геохимия*, **53**(7), 661-667. <https://doi.org/10.7868/S001675251507002X>
- Жерновский И.В., Мочалов А.Г. (1999) Генетическая кристаллография гексагональных твердых растворов осмия, рутения и иридия как показатель условий и образования. *Геология руд. месторождений*, **41**(6), 546-561.
- Золотов 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.
- Кадик А.А., Жаркова Е.В., Рудашевский Н.С. (1993) Окислительно-восстановительные условия формирования минералов (Os, Ir, Ru, Pt) и (Pt, Fe) ультрамафических комплексов. *Докл. РАН*, **331**(3), 349-352.
- Киселева О.Н., Айриянц Е.В., Белянин Д.К., Жмодик С.М. (2022) Химические и микроструктурные особенности минералов платиновой группы, формировавшихся на различных стадиях развития Оспино-Китойского офиолитового массива юго-восточной части Восточного Саяна. *Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал*. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 46-49.
- Малич К.Н., Аникина Е.В., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Пушкарев Е.В., Хиллер В.В. (2016) Вещественный состав и осмиевая изотопия первичных и вторичных ассоциаций минералов платиновой группы магнетиальных хромититов Нуралинского перцолитового массива (Ю. Урал, Россия). *Геология руд. месторождений*, **58**(1), 3-22. <https://doi.org/10.7868/S0016777015050032>
- Мурзин В.В., Баданина И.Ю., Малич К.Н., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А. (2019a) Изотопный состав серы Ru-Os сульфидов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, Средний Урал (Россия): первые данные. *Докл. АН*, **448**(2), 185-188. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524882185-188>
- Мурзин В.В., Кисин А.Ю., Баданина И.Ю., Малич К.Н. (2019b) Минералы платиновой группы в россыпях Мурзинского гранитогнейсового массива на Среднем Урале и проблема индикаторной роли состава Os-Ir-Ru минералов. *Металлогения древних и современных океанов – 2019*. Миасс; Екатеринбург: Форт-Диалог-Исеть, 212-216.
- Мурзин В.В., Кисин А.Ю., Варламов Д.А. (2015) Минералы платиновой группы из россыпи Мурзинско-Адуйского гранитогнейсового комплекса и их возможные источники. *Минералогия*, (1), 34-48.
- Мурзин В.В., Малич К.Н., Баданина И.Ю., Варламов Д.А., Чашухин И.С. (2023) 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., Малич К.Н., Кисин А.Ю. (2025) Вторичные минералы платиновой группы россыпи реки Большой Сап (Средний Урал). *Минералогия*, **11**(1), 5-16. DOI: 10.35597/2313545X-2025-11-1-1. EDN: FPDVZT
- Мурзин В.В., Суставов С.Г., Мамин Н.А. (1999) Золотая и платиноидная минерализация россыпей Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал). Екатеринбург: УГГГА, 93 с.
- Некрасова А.А., Гришанова Н.В., Азовскова О.Б. (2015) Вещественный состав платиноидов их рыхлых отложений Актайской площади (Средний Урал). *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Вып. 18. Пермь: Перм. гос. ун-т, 36-43.
- Осипенко А.Б., Сидоров Е.Г., Костоянов А.И., Толстых Н.Д. (2002) Хромититы гипербазитовых массивов п-ова Валижген, Корякия. *Геология руд. месторождений*, **44**(1), 77-92.
- Рудашевский Н.С., Костоянов А.И., Рудашевский В.Н. (1999) Минералогические и изотопные свидетельства происхождения массивов альпинотипной формации (на примере Усть-Бельского массива, Корякское нагорье). *Зан. ВМО*, **128**(4), 11-28.
- Сидоров Е.Г. (2009) Платиноносность базит-гипербазитовых комплексов Корякско-Камчатского региона. Автореф. ... докт. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 36 с.
- Чашухин И.С. (2019) О генетических типах дунитов в ультрамафитах складчатых областей (на примере Урала). *Изв. УГТУ*, **54**(2), 42-48. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-42-48>
- Чашухин И.С. (1999) Хромиты. *Месторождения полезных ископаемых Урала*. Екатеринбург: УрО РАН, 51-63.
- Чашухин И.С., Булыкин Л.Д., Чашухина В.А. (2005) О природе хромитового оруденения в породах дунит-клинопироксенитового комплекса офиолитов Среднего Урала. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 152, 353-358.
- Чашухин И.С., Мамина В.М., Сурганов А.В., Чашухина В.А., Булыкин Л.Д., Гмыра В.Г. (2004) Закономерности состава акцессорной и рудообразующей шпинели в ультрамафитах Первомайского массива. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 151, 206-217.
- Штейнберг Д.С., Чашухин И.С., Уймин С.Г. (1990) Положение хромитового оруденения в истории формирования альпинотипных гипербазитов. *Геохимия рудных элементов в базитах и гипербазитах. Критерии прогноза*. Иркутск: ИГ СО РАН, 166-170.
- Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Belousova E.A., Meisel T.C. (2016) Closed-system behaviour of the Re-Os isotope system recorded in primary and secondary PGM assemblages: Evidence from a mantle chromitite at Harold's Grave (Shetland ophiolite Complex, Scotland). *Ore Geol. Rev.*, **75**, 174-185.

- Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Meisel T.C. (2013) Origin of primary PGM assemblage in chromitite from a mantle tectonite at Harold's Grave (Shetland ophiolite complex, Scotland). *Mineral. Petrol.*, **107**, 963-970.
- Bai W., Robinson P.T., Fang Q., Yang J., Yan B., Zhang Z., Xu-Feeng Hu, Zhou M.-F., Malpas J. (2000) The PGE and base metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. *Canad. Miner.*, **38**, 585-598. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.3.585>
- 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>
- Beaudoin G., Taylor B.E., Rumble III D., Thiemens M. (1994) Variations in the sulfur isotope composition of troilite from the Cañon Diablo iron meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**(19), 4253-4255. doi:10.1016/0016-7037(94)90277-1
- Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.V. (1996) The mineralogy and distribution of platinum group mineral (PGM) placer deposits of the world. *Explor. Min. Geol.*, **5**(2), 73-167.
- 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 Geol. Rev.*, **144**, 104733. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104733>
- Cartigny P., Farquhar J., Thomassot E., Harris J.W., Wing B., Masterson A., McKeegan K., Stachel T. (2009) A mantle origin for Paleoproterozoic peridotitic diamonds from the Panda kimberlite, Slave Craton: evidence from ^{13}C , ^{15}N and $^{33,34}\text{S}$ -stable isotope systematics. *Lithos*, **112**, 852-864.
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. (2008) Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai ophiolite complex. *Mineral. Petrol.*, **92**, 31-58. <https://doi.org/10.1007/s00710-007-0207-3>
- Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinitised and weathered chromitite of the Vourinos complex, Greece. *Canad. Miner.*, **35**, 611-626.
- González-Jiménez J.M., Reich M., Camprubí A., Gervilla F., Griffin W.L., Colás V., O'Reilly S.Y., Proenza J.A., Pearson N.J., Centeno-García E.C. (2015) Thermal metamorphism of mantle chromites and the stability of noble metal nanoparticles. *Contr. Miner. Petrol.*, **170**, 15. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1169-9>
- Hagen D., Weiser Th., Htay Than (1990) Platinum-group minerals in quaternary gold placers in the upper Chindwin area of northern Burm. *Mineral. Petrol.*, **42**, 265-286.
- Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Miner.*, **29**(2), 231-237.
- Hattori K.H., Cabri L.J., Johanson B., Zientek M.L. (2004) Origin of placer laurite from Borneo: Se and As contents, and S isotopic compositions. *Mineral. Magaz.*, **68**(2), 353-368.
- Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., Levitskii V.I. (2018) Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femto-second laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chem. Geol.*, **493**, 316-326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>
- Kiseleva O.N., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Zhmodik S.M. (2020) Podiform chromitites and PGE mineralization in the Ulan-Sar'dag ophiolite (East Sayan, Russia). *Minerals*, **10**, 141. <https://doi.org/10.3390/min10020141>
- Kiseleva O., Zhmodik S. (2017) PGE mineralization and melt composition of chromitites in Proterozoic ophiolite complexes of Eastern Sayan, Southern Siberia. *Geosci. Front.*, **8**, 721-731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.003>
- Malitch K.N., Badanina I.Y., Belousova E.A., Murzin V.V., Velivetskaya T.A. (2021) Origin of Ru-Os sulfides from the Verkh-Neivinsk ophiolite massif (Middle Urals, Russia): compositional and S-Os isotope evidence. *Minerals*, **11**, 329. <https://doi.org/10.3390/min11030329>
- Malitch K.N., Melcher F., Mühlhans H. (2001) Palladium and gold mineralization in podiform chromitite at Krauth, Austria. *Mineral. Petrol.*, **73**, 247-277.
- Melcher F., Grum W., Thalhammer T.V., Thalhammer O.A.R. (1997) Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in Chromite. *J. Petrol.*, **38**(10), 1419-1458.
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Kissin A., Varlamov D. (2018) Physicochemical model of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks at the Karabash massif of ultramafic rocks (Southern Urals, Russia). *Minerals*, **8**(7), 306. <https://doi.org/10.3390/min8070306>
- Oberthür T., Melcher F., Goldmann S., Wotruba H., Dijkstra A., Gerdes A., Dale C. (2016) Mineralogy and mineral chemistry of detrital heavy minerals from the Rhine River in Germany as evidence of their provenance, sedimentary and depositional history: Focus on platinum-group minerals and remarks on cassiterite, columbite group minerals, and uraninite. *Int. J. Earth Sci.*, **105**, 637-657. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1181-3>
- Prichard H.M., Tarkian M. (1988) Platinum and palladium minerals from two PGE localities in the Shetland ophiolite complex. *Canad. Miner.*, **26**, 979-990.
- Thode H., Monster J., Dunford H. (1961) Sulphur isotope geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **25**, 159-174.
- Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. (2019) An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **33**, 1722-1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>
- Yang K., Seccombe P.K. (1993) Platinum-group minerals in the chromitites from the Great Serpentine Belt, NSW, Australia. *Mineral. Petrol.*, **47**, 263-286.
- Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Kazakov I. (2016) Platinum-group minerals and other accessory phases in chromite deposits of the Alapaevsk ophiolite, Central Urals, Russia. *Minerals*, **6**, 108. <https://doi.org/10.3390/min6040108>

REFERENCES

- Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., Belousova E.A., Meisel T.C. (2016) Closed-system behaviour of the Re-Os isotope system recorded in primary and secondary PGM assemblages: Evidence from a mantle chromitite at Harold's Grave (Shetland ophiolite Complex, Scotland). *Ore Geol. Rev.*, **75**, 174-185.
- Badanina I.Y., Malitch K.N., Lord R.A., Meisel T.C. (2013) Origin of primary PGM assemblage in chromitite from a mantle tectonite at Harold's Grave (Shetland ophiolite

- complex, Scotland). *Mineral. Petrol.*, **107**, 963-970.
- Badanina I.Y., Malitch K.N., Murzin V.V., Zharkova E.V., Kadik A.A. (2015) Results of experimental determination of the intrinsic oxygen fugacity of Ru-Os-Ir alloys from the Verkh-Neivinsky dunite-harzburgite massif, Middle Urals, Russia. *Geochem. Int.*, **53**(7), 658-663 (translated from *Geokhimiya*, **53**(7), 661-667). <https://doi.org/10.7868/S001675251507002X>
- Bai W., Robinson P.T., Fang Q., Yang J., Yan B., Zhang Z., Xu-Feeng Hu, Zhou M.-F., Malpas J. (2000) The PGE and base metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. *Canad. Miner.*, **38**, 585-598. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.3.585>
- 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>
- Beaudoin G., Taylor B.E., Rumble III D., Thiemens M. (1994) Variations in the sulfur isotope composition of troilite from the Cañon Diablo iron meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**(19), 4253-4255. doi:10.1016/0016-7037(94)90277-1
- Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.V. (1996) The mineralogy and distribution of Platinum Group Mineral (PGM) placer deposits of the world. *Explor. Miner. Geol.*, **5**(2), 73-167.
- 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 Geol. Rev.*, **144**, 104733. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104733>
- Cartigny P., Farquhar J., Thomassot E., Harris J.W., Wing B., Masterson A., McKeegan K., Stachel T. (2009) A mantle origin for Paleoproterozoic peridotitic diamonds from the Panda kimberlite, Slave Craton: evidence from ^{13}C -, ^{15}N - and $^{33,34}\text{S}$ -stable isotope systematics. *Lithos*, **112**, 852-864.
- Chashchukhin I.S. (2019) About the genetic types of dunites in folded ultramafites areas (using the Urals as an example). *Izvestiya Ural'skogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*, **54**(2), 42-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-42-48>
- Chashchukhin I.S. (1999) Chromites. *Mineral deposits of the Urals*. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 51-63. (In Russ.)
- Chashchukhin I.S., Bulykin L.D., Chashchukhina V.A. (2005) On the nature of chromite mineralization in rocks of the dunite-clinopyroxenite complex of ophiolites of the Middle Urals. *Trudy IGG UrO RAN*, **152**, 353-358. (In Russ.)
- Chashchukhin I.S., Mamina V.M., Surganov A.V., Chashchukhina V.A., Bulykin L.D., Gmyra V.G. (2004) Regularities of the composition of accessory and ore-forming spinel in ultramafites of the Pervomaisky massif. *Trudy IGG UrO RAN*, **151**, 206-217. (In Russ.)
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. (2008) Ore petrology of chromite-PGE mineralization in the Kempirsai ophiolite complex. *Mineral. Petrol.*, **92**, 31-58 <https://doi.org/10.1007/s00710-007-0207-3>
- Garuti G., Zaccarini F. (1997) In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitite of the Vourinos complex, Greece. *Canad. Miner.*, **35**, 611-626.
- González-Jiménez J.M., Reich M., Camprubí A., Gervilla F., Griffin W.L., Colás V., O'Reilly S.Y., Proenza J.A., Pearson N.J., Centeno-García E.C. (2015) Thermal metamorphism of mantle chromites and the stability of noble metal nanoparticles. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**, 15. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1169-9>
- Hagen D., Weiser Th., Htay Than. (1990) Platinum-group minerals in quaternary gold placers in the upper Chindwin area of northern Burm. *Mineral. Petrol.*, **42**, 265-286.
- Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Miner.*, **29**(2), 231-237.
- Hattori K.H., Cabri L.J., Johanson B., Zientek M.L. (2004) Origin of placer laurite from Borneo: Se and As contents, and S isotopic compositions. *Mineral. Magaz.*, **68**(2), 353-368.
- Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Budnitskiy S.Y., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V., Levitskii V.I. (2018) Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femto-second laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chem. Geol.*, **493**, 316-326. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.06.006>
- Kadik A.A., Zharkova E.V., Rudashevskii N.S. Oxidation-reduction conditions for the formation of minerals (Os, Ir, Ru, Pt) and (Pt, Fe) of ultramafic complexes. *Dokl. Akad. Nauk*, **331**(3), 349-352. (In Russ.)
- Kiseleva O.N., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Zhmodik S.M. (2020) Podiform chromitites and PGE mineralization in the Ulan-Sar'dag Ophiolite (East Sayan, Russia). *Minerals*, **10**, 141. doi:10.3390/min10020141
- Kiseleva O.N., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Zhmodik S.M. (2022) Chemical and microstructural features of the platinum-group minerals formed at different stages of the ophiolite Ospa-Kitoi massif development (South-Eastern part of Eastern Sayan). *Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential*. Apatity, FITs KNTs RAN Publ., 46-49. (In Russ.)
- Kiseleva O., Zhmodik S. (2017) PGE mineralization and melt composition of chromitites in Proterozoic ophiolite complexes of Eastern Sayan, Southern Siberia. *Geosci. Front.*, **8**, 721-731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.003>
- Malitch K.N., Anikina E.V., Badanina I.Y., Pushkarev E.V., Khiller V.V., Belousova E.A. (2016) Chemical composition and osmium-isotope systematics of primary and secondary PGM assemblages from high-Mg chromitite of the Nurali Iherzolite, the South Urals, Russia. *Geology of Ore Deposits*, **58** (1), 1-19 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **58**(1), 3-22). <https://doi.org/10.1134/S1075701515050037>
- Malitch K.N., Badanina I.Y., Belousova E.A., Murzin V.V., Velivetskaya T.A. (2021) Origin of Ru-Os sulfides from the Verkh-Neivinsk ophiolite massif (Middle Urals, Russia): compositional and S-Os isotope evidence. *Minerals*, **11**, 329. <https://doi.org/10.3390/min11030329>
- Malitch K.N., Melcher F., Mühlhans H. (2001) Palladium and gold mineralization in podiform chromitite at Krauthaus, Austria. *Mineral. Petrol.*, **73**, 247-277.
- Melcher F., Grum W., Thallhammer T.V., Thallhammer O.A.R. (1997) Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in Chromite. *J. Petrol.*, **38**(10), 1419-1458.
- Murzin V.V., Badanina I.Yu., Malitch K.N., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A. (2019a) Sulfur Isotope Composition of Ru-Os Sulfides from the Verkh-Neivinsky Dunite-

- Harzburgite Massif (Middle Urals, Russia): New Data. *Doklady Earth Sciences*, **488**(1), 1097-1099. (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **448**(2), 185-188). <https://doi.org/10.1134/S1028334X19090186>
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Kissin A., Varlamov D. (2018) Physicochemical model of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks at the Karabash massif of ultramafic rocks (Southern Urals, Russia). *Minerals*, **8**(7), 306. <https://doi.org/10.3390/min8070306>
- Murzin V.V., Kisin A.Yu., Badanina I.Yu., Malitch K.N. (2019b) Platinum group minerals in placers of the Murzinsky granite-gneiss massif in the Middle Urals and the problem of the indicator role of the composition of Os-Ir-Ru minerals. *Metallogeny of ancient and modern oceans – 2019*. Miass-Ekaterinburg, Fort-Dialog-Iset' Publ., 212-216. (In Russ.)
- Murzin V.V., Kisin A.Yu., Varlamov D.A. (2015) PGM minerals from placer of the Murzinka-Adui granite gneissic complex and their possible sources. *Mineralogiya*, **1**, 34-48. (In Russ.)
- Murzin V.V., Malitch K.N., Badanina I.Yu., Varlamov D.A., Chashchukhin I.S. (2023) Mineral assemblages from chromitites of the Alapaevsk dunite-harzburgite massif (Middle Urals). *Litosphere (Russia)*, **23**(5), 740-765. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-740-765>
- Murzin V.V., Malitch K.N., Kisin A.Yu. (2025) Secondary platinum-group minerals from placer of the Bolshoy Sap River (Middle Urals). *Mineralogiya*, **11**(1), 6-16. (In Russ.) DOI: 10.35597/2313545X-2025-11-1-1. EDN: FPDVZT
- Murzin V.V., Sustavov S.G., Mamin N.A. (1999) Gold and platinum-group element mineralization of placer deposits of the Verkh-Neivinsky massif of Alpine-type ultrabasites (the Middle Urals), Ekaterinburg, UGGA Publ., 93 p. (In Russ.)
- Nekrasova A.A., Grishanova N.V., Azovskova O.B. (2015) Material composition of platinum group metals from loose sediments of the Aktai area (Middle Urals). *Problemy Mineralogii, Petrografii i Metallogenii*. Vyp. 18. Perm', Permskii Gos. Universitet Publ., 36-43. (In Russ.)
- Osipenko A.B., Sidorov E.G., Kostoyanov A.I., Tolstykh N.D. (2002) Chromitites of ultramafic complexes of the Valizhgen Peninsula, Koryak Highland. *Geol. Ore Depos.*, **44**(1), 69-83 (translated from *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **44**(1), 77-92).
- Prichard H.M., Tarkian M. (1988) Platinum and palladium minerals from two PGE localities in the Shetland ophiolite complex. *Canad. Miner.*, **26**, 979-990.
- Rudashevskii N.S., Kostoyanov A.I., Rudashevskii V.N. (1999) Mineralogical and isotopic evidence of the origin of massifs of the alpine-type formation (using the example of the Ust-Belsky massif, Koryak Highlands). *Zapiski Vserossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, **128**(4), 11-28. (In Russ.)
- Shteinberg D.S., Chashchukhin I.S., Uimin S.G. (1990) The position of chromite mineralization in the history of the formation of alpine-type hyperbasites. Geochemistry of ore elements in basites and hyperbasites. Prediction criteria. Irkutsk, IG SO RAN Publ., 166-170. (In Russ.)
- Sidorov E.G. (2009) Platinum content of basite-hyperbasite complexes of the Koryak-Kamchatka region. Petropavlovsk-Kamchatsky, 36 p. (In Russ.)
- Oberthür T., Melcher F., Goldmann S., Wotruba H., Dijkstra A., Gerdes A., Dale C. (2016) Mineralogy and mineral chemistry of detrital heavy minerals from the Rhine River in Germany as evidence of their provenance, sedimentary and depositional history: Focus on platinum-group minerals and remarks on cassiterite, columbite-group minerals, and uraninite. *Int. J. Earth Sci.*, **105**, 637-657. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1181-3>
- Thode H., Monster J., Dunford H. (1961) Sulphur isotope geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **25**, 159-174.
- Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Yakovenko V.V., Vysotskiy S.V. (2019) An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **33**, 1722-1729. <https://doi.org/10.1002/rcm.8528>
- Yang K., Seccombe P.K. (1993) Platinum-group minerals in the chromitites from the Great Serpentine Belt, NSW, Australia. *Mineral. Petrol.*, **47**, 263-286.
- Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Kazakov I. (2016) Platinum-group minerals and other accessory phases in chromite deposits of the Alapaevsk ophiolite, Central Urals, Russia. *Minerals*, **6**, 108. <https://doi.org/10.3390/min6040108>
- Zhernovskiy I.V., Mochalov A.G. Genetic crystallography of hexagonal solid solutions of osmium, ruthenium and iridium as an indicator of conditions and formation. *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **41**(6), 546-561. (In Russ.)
- Zoloev K.K., Volchenko Ya.A., Koroteev V.A., Malakhov I.A., Mardirosoyan A.N., Khrypov V.N. (2001) Platinum-metal mineralization in the geological complexes of the Urals. Ekaterinburg, UGSE Publ., 199 p. (In Russ.)