

УДК 553.491.8:553.08

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-521-545

Типоморфные особенности минералов платиновой группы из аллювия Кытлымского платиноносного узла (Северный Урал), Россия

Г. В. Нестеренко, Е. В. Айриянци, С. М. Жмодик, Д. К. Белянин

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3,
e-mail: jenny@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г., принята к печати 09.07.2024 г.

Объект исследования. В статье изложены результаты комплексного изучения минералов платиновой группы из платиноносных аллювиальных россыпей р. Косьва, дренирующей Кытлымский концентрически-зональный ультрамафитовый массив (Северный Урал) и ее южного притока руч. Богатый Лог. **Материалы и методы.** Материалы для исследования отобраны в 1990–1991 гг. в рамках выполнения хозяйственных работ. Элементный состав и микротекстульные особенности минералов платиновой группы определялись с помощью рудной (AxioScope.A1) и сканирующей электронной (MIRA 3 LMU с системой микроанализа INCA Energy 450 XMax 80) микроскопии. **Результаты.** Установлено, что минералы платиновой группы в россыпях р. Косьва и руч. Богатый Лог представлены Pt-Fe($\pm$ Cu) сплавами с включениями Os-Ir-(Ru) интерметаллидов, лаурита, ирарсита. Для большинства зерен характерно постмагматическое метасоматическое преобразование, проявляющиеся в псевдоморфном замещении и формировании кайм тетраферроплатина–туламинитового состава. Среди вторичных минералов платиновой группы установлен неназванный – интерметаллид олова, родия, меди, палладия и платины (Rh,Cu,Pd,Pt)₃Sn. **Выводы.** Коренными источниками платиноносных россыпей служат ультрамафитовые комплексы Кытлымского концентрически-зонального ультрамафитового массива, прежде всего хромититы из эродированных серпентинизированных дунитов. Зерна МПГ не несут следов интенсивного гипергенного химического преобразования и полностью наследуют состав платиновой минерализации коренных источников, питающих россыпи. Влияние промежуточных дочетвертичных коллекторов на формирование изученных платиноносных россыпей минимально.

Ключевые слова: минералы платиновой группы, Северный Урал, Кытлымский концентрически-зональный ультрамафитовый массив, типоморфные особенности минералов

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 122041400193-7) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

Typomorphic features of platinum group minerals from alluvium of the Kytlym platinum-bearing cluster (North Ural), Russia

Gleb V. Nesterenko, Evgeniya V. Airiyants, Sergey M. Zhmodik, Dmitriy K. Belyanin

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptug av., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: jenny@igm.nsc.ru

Received 12.03.2024, accepted 09.07.2024

Research subject. The article presents the results of an integrated study of platinum group minerals from platinum-bearing alluvial placers of the river Kosva, draining the Kytlym concentrically zonal ultramafic massif (Northern Urals) and its southern tributary stream Bogaty Log. **Materials and methods.** Materials were sampled during the fieldwork of 1990–1991. The chemical composition and structural and textural features of platinum group minerals were determined using ore (AxioScope.A1) and scanning electron (MIRA 3 LMU with an INCA Energy 450 XMax 80 microanalysis system) microscopy. **Results.** Platinum group minerals in placers of the river Kosva and stream Bogaty Log are represented by Pt-Fe($\pm$ Cu) alloys, which correspond to isoferroplatinum and ferroan platinum with inclusions of Os-Ir-(Ru) intermetallic compounds, laurite, and irarsite. Most grains of platinum group minerals were subject to postmagmatic alteration, which manifested itself in the formation of replacement rims of a tetraferroplatinum–thulaminite composi-

Для цитирования: Нестеренко Г.В., Айриянци Е.В., Жмодик С.М., Белянин Д.К. (2025) Типоморфные особенности минералов платиновой группы из аллювия Кытлымского платиноносного узла (Северный Урал), Россия. *Литосфера*, 25(3), 521–545. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-521-545>. EDN: EWFHUB

For citation: Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Zhmodik S.M., Belyanin D.K. (2025) Typomorphic features of platinum group minerals from alluvium of the Kytlym platinum-bearing cluster (North Ural), Russia. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 521–545. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-521-545>. EDN: EWFHUB

tion. Among the secondary platinum group minerals, the authors encountered a mineral phase – unnamed intermetallic compound of rhodium, copper, palladium, and tin (Rh,Cu,Pd,Pt)₃Sn that has not been previously described in nature. *Conclusions.* The main sources of platinum-bearing placers are ultramafic complexes of the Kytlym concentrically zonal ultramafic massif, primarily chromitites from eroded serpentinized dunites. The grains of platinum group minerals do not bear traces of hypergene chemical alteration and completely inherit the composition of platinum mineralization from the primary sources that feed the placers. The influence of intermediate pre-Quaternary reservoirs on the formation of the studied platinum placers is minimal.

Keywords: *platinum group minerals, Northern Urals, Kytlym concentrically zoned ultramafic massif, typomorphic features of minerals*

Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (no. 122041400193-7)

Acknowledgements

This article is the last work of Gleb Vasilyevich Nesterenko (01.21.1927–07.06.2023). G.V. Nesterenko was a pioneer in the discovery of natural gold sulfide, known as petrovskaite. His passion for life and unwavering curiosity about geology served as an inspiration to his colleagues. The authors express their gratitude to the editors and reviewers for their work, valuable comments, and suggestions. The work was carried out at the Center for Collective Use of Multielement and Isotope Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

ВВЕДЕНИЕ

Концентрически-зональные ультрамафитовые комплексы (КЗУМ) (Иванов, 1997; и др.) являются основными структурно-вещественными комплексами Платиноносного пояса Урала. В современной международной литературе такие комплексы получили название комплексов урало-аляскинского типа (Платиноносность..., 1995; Толстых и др., 1996; Garuti et al., 1997; Fedortchuk et al., 2010; и др.). Кытлымский платиноносный узел представлен одноименным массивом площадью более 720 км², расположенным на восточном склоне Северного Урала (рис. 1). Кытлымский КЗУМ, наряду с другими массивами Платиноносного пояса Урала, имеет солидную историю изучения, начинающуюся с конца XIX в. (Зайцев, 1898; Высоцкий, 1923; Заварицкий, 1928; Ефимов, Ефимова, 1967; Волченко и др., 1994; Иванов, 1997; Разин, 2008; Garuti et al., 2002; Готтман, Пушкарев, 2009; Петров, Маслов, 2010; Толстых и др., 2011; Пушкарев и др., 2016; Степанов и др., 2017; Zaccarini et al., 2018; Михайлов и др., 2021; и др.) и может рассматриваться как один из эталонных массивов.

Основным геолого-промышленным типом, формирующим платиносодержащие россыпи Урала, является платиновая минерализация габбро-периidotитовой ассоциации КЗУМов. В связи с этим и большая часть научных исследований была преимущественно направлена на изучение коренного оруденения (Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935;

Кашин и др., 1956; Степанов, 2015; Кузьмин и др., 2020; и др.). Между тем исследованию платиновой минерализации из россыпей уделялось гораздо меньшее внимание. В последние годы появился ряд исследований на современном аналитическом уровне состава и характера преобразования минералов платиновой группы (МПГ) при переходе из коренных руд в россыпи (Баранников, Осовецкий, 2014; Паламарчук и др., 2017; Степанов и др., 2017). Однако значительное количество россыпей изучено недостаточно. При этом исследование особенностей МПГ из элювиальных и делювиальных россыпей позволяет понять процессы, протекающие на различных стадиях формирования крупных россыпных объектов и увязать россыпную минерализацию с определенным типом коренного оруденения. На сегодняшний день исследование типоморфизма и типохимизма МПГ из аллювиальных россыпей остается важной и актуальной проблемой, поскольку позволяет решать вопросы источников и условий образования и преобразования МПГ как на эндогенных, так и на экзогенных стадиях развития. Важным моментом является установление статистических и индивидуальных особенностей зерен: морфологии, химического состава, микротекстурного строения зерен, наличия и состава микровключений. Изучение типохимических особенностей шлиховых минералов платиновой группы, основывающееся не только на традиционных, но и на современных микроскопических методах, приобретает практи-

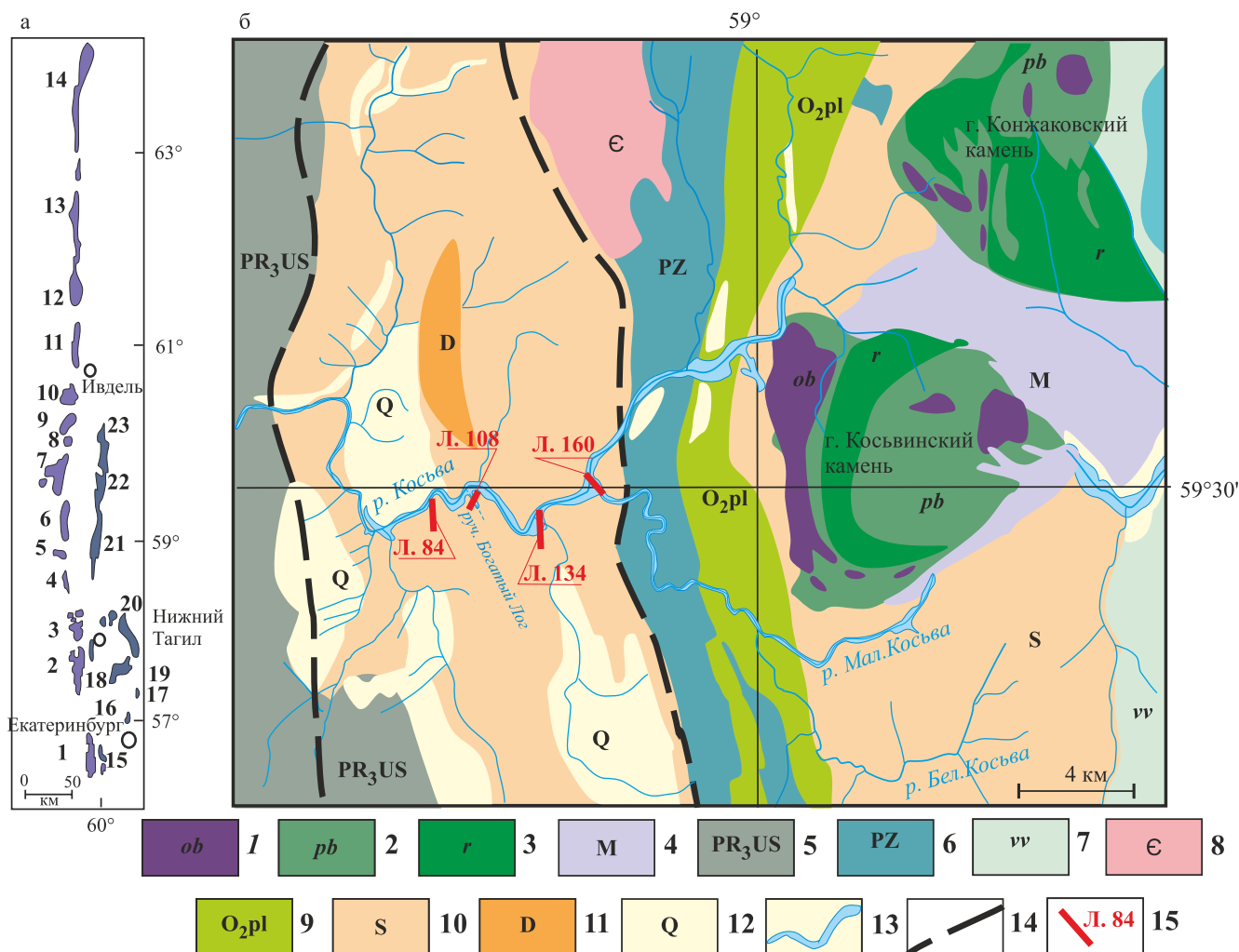


Рис. 1. Положение Кытлымского узла в Платиноносном поясе Урала (а) (Волченко и др., 1998) и схематическое геологическое строение Кытлымского платиноносного узла с привязкой мест отбора выборок МПГ (б) (Государственная ..., 2005).

а. КЗУМ: 1 – Ревдинский, 2 – Нижнетагильский, 3 – Тагило-Баранчинский, 4 – Арбатский, 5 – Качканарский, 6 – Павдинский, 7 – Кытлымский, 8 – Княслинский, 9 – Кумбинский, 10 – Денежкинский, 11 – Помурский, 12 – Чистопский, 13 – Ялпинг-Ньерский, 14 – Хорасюрский; пояса альпинотипных гипербазитов: 15 – Ключевской, 16 – Пышмынский, 17 – Гологорский, 18 – Верх-Нейвинский, 19 – Баженовский, 20 – Алапаевский, 21 – Восточно-Тагильский, 22 – Кольский, 23 – Устейский.

б. Интрузивные образования КЗУМа: 1 – дуниты, 2 – пироксениты, 3 – габбро, 4 – кытлымиты; 5 – верхнепротерозойская подгруппа: метаморфизованные основные породы, сланцы; 6 – нерасчлененный палеозой: кварцево-сланцисто-хлоритовые сланцы; 7 – средний-верхний ордовик: амфиболиты, сланцы, песчаники; 8 – кембрийская система: слюдистые кварциты, конгломераты; 9 – ордовикская система: слюдисто-хлоритовые сланцы; 10 – силурийская система: известняки, доломиты, глинистые сланцы, диабазовые порфириды; 11 – девонская система: песчаники, сланцы, известняки; 12 – четвертичный аллювий; 13 – отработанный платиноносный аллювий; 14 – контуры Вишерско-Висимской депрессии; 15 – пункты отбора выборок МПГ (разведочные линии шурфов и их номера).

Fig. 1. Position of the Kytlym node in the Platinum Belt of the Urals (a) (Volchenko et al., 1998) and schematic geological structure of the Kytlym platinum-bearing cluster with reference to the locations of PGM sampling (b) (State ..., 2005).

а. КЗУМ: 1 – Revdinsky, 2 – Nizhny Tagil, 3 – Tagil-Baranchinsky, 4 – Arbatsky, 5 – Kachkanarsky, 6 – Pavdinsky, 7 – Kytlymsky, 8 – Knyaslinsky, 9 – Kumbinsky, 10 – Denezhkinsky, 11 – Pomursky, 12 – Chistopsky, 13 – Yalping-Nyersky, 14 – Khorasur, 15 – Klyuchevskoy, 16 – Pyshmysky, 17 – Gologorsky, 18 – Verkh-Neivinsky, 19 – Bazhenovsky, 20 – Alapaevsky, 21 – East Tagil, 22 – Kola, 23 – Usteisky.

б. Intrusive formations of KZUM: 1 – dunites, 2 – pyroxenites, 3 – gabbro, 4 – kytlymites; 5 – Upper Proterozoic subgroup: metamorphosed basic rocks, shales; 6 – undifferentiated Paleozoic: quartz-mica-chlorite schists; 7 – Middle-Upper Ordovician: amphibolites, shales, sandstones; 8 – Cambrian system: mica quartzites, conglomerates; 9 – Ordovician system: mica-chlo-

rite schists; 10 – Silurian system: limestones, dolomites, shales, diabase porphyrites, 11 – Devonian system: sandstones, shales, limestones, 12 – Quaternary alluvium, 13 – spent platinum-bearing alluvium, 14 – contours of the Vishera-Visim depression, 15 – sampling points MPG (exploration pit lines and their numbers).

ческое значение, поскольку позволяет конкретизировать геологический прогноз (Баранников, Осовецкий, 2014), а также усовершенствовать принципы рационального недропользования, решать задачи по улучшению технологии поиска и разведки месторождений.

Целью данной работы является детальное исследование типоморфных особенностей МПГ двух платиноносных россыпей Кытлымского платиноносного узла: р. Косьва и ее притока – руч. Богатый Лог. Задачи исследования включали изучение зерен МПГ современными локальными методами анализа и сопоставление полученных результатов с опубликованными данными по платиновой минерализации коренных ультрамафитовых пород Кытлымского массива.

ГЕОЛОГИЯ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Рассматриваемый Кытлымский платиноносный узел (Разин, 2008) расположен в южной части Северного Урала (см. рис. 1а). Существенную часть узла составляет Кытлымский КЗУМ. Изучение его продолжается на протяжении более 170 лет. Результаты одного из первых детальных исследований изложены в работе (Ефимов, Ефимова, 1967). Обширный обзор публикаций прошлого столетия приведен О.К. Ивановым (1997). Кытлымский КЗУМ разбит на пять разрозненных блоков и условно разделен на две части – восточную и западную (Пушкарев и др., 2007). Западная сложена породами дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса (Тылай-Конжаковский, Косьвинский массивы), а восточная – преимущественно габбро (Валенторский, Серебрянский, Сухогорский). При этом дуниты, слагающие ядра массивов, чаще тяготеют к западным, более эродированным, частям. Вмещающие породы представлены ордовик-силурийскими вулканогенно-осадочными и метаморфогенно-преобразованными толщами известняков, доломитов, глинистых сланцев, диабазовых порфириров. В пределах Кытлымского узла широко распространены дизъюнктивные нарушения, что указывает на приуроченность его, как и всего Платиноносного пояса, к зоне глубинного, долгоживущего разлома. Ю.А. Волченко с соавторами (1994, 1998, 2007) включают Кытлымский КЗУМ в платиноносный пояс “структурно-вещественных комплексов обстановок ранних островных дуг, в той или иной мере трансформированных в обстановках поздних островных дуг”. Отмечается приуроченность пояса к зоне субдукции. Данные о платиноносности Кытлымского КЗУМа содер-

жатся во многих публикациях (Иванов, 1997; Волченко и др., 1998, 2007; Garuti et al., 2002; Пушкарев и др., 2007; Разин, 2008; Степанов, 2018; Zaccarini et al., 2011, 2018; Zaykov et al., 2017; и др.). Платиновая минерализация представлена в основном Pt-Fe сплавами (на 98 %), при подчиненном количестве Os-Ru-Ir сплавов.

Аллювиальные отложения региона, наряду с современными, включают древние погребенные (J, K, P) осадки. Древние речные потоки, предположительно, имели субмеридианальную направленность в отличие от современной, преимущественно субширотной (Баранников, 2015). Результаты датирования космогенного ^3He (Якубович и др., 2021) свидетельствуют о длительной, порядка 30 млн лет, истории формирования россыпных МПГ, в частности, на р. Ис (Средний Урал). Полученные данные, по мнению авторов, “могут отражать многократное переотложение материала в ходе его транспортировки либо указывать на длительность этапов предварительной концентрации полезных компонентов во время этапов пенепленизации”. При этом следует предполагать, что аллювиальные МПГ, наследуя коренную минерализацию, могут в той или иной степени трансформироваться.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Коллекция МПГ отобрана одним из авторов в 1990–1991 гг. в ходе выполнения хоздоговорных работ с объединением “Главалмаззолото”. Коллекция включает четыре выборки по 10–20 зерен (табл. 1), полученных из фракции тяжелого шлиха аллювиальных отложений р. Косьва и руч. Богатый Лог, отобранного вдоль разведочных линий Л-160, Л-134, Л-108, Л-84 (см. рис. 1). Полученные шлихи подвергнуты магнитной и электромагнитной сепарации, в результате чего выделены магнетитовые фракции и фракции хромшпинелидов.

Описание морфологических особенностей зерен МПГ осуществлялось с помощью бинокулярного микроскопа. Далее зерна цементировались эпоксидным компаундом в виде искусственных аншлифов-шашек, которые полировались алмазными пастами для последующей диагностики и детального изучения. Методами рудной микроскопии (AxioScope.A1, Carl Zeiss AG, Germany) изучались микротектурные особенности и строение зерен. Фотографии в обратнорассеянных электронах (BSE), элементные карты, качественный и количественный анализ минералов получены на сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding, Czech Republic) с системой микроанали-

Таблица 1. Краткая характеристика МПГ из россыпей р. Косьва (1–3) и руч. Богатый Лог (4)

Table 1. Summary characteristics of PGMs from placers of the river Kosva (1–3) and stream Bogaty Log (4)

№ обр.	№ пробы	Масса/кол-во зерен = ср. масса, мг	Размеры (min и max), мм	$K_{уп}^*$, %	Морфология	Характеристика поверхности	$CT_{ок}^{**}$
1	Л-84	59/110 = 0.5	0.15 × 0.20 0.95 × 1.30	15	Комковидная, реже таблитчатая и деформированные кристаллы Pt(Fe)	Мелкошагреневая, ямчато-бугорчатая, редкие отпечатки других минералов	1, 2, 3
2	Л-134	70.5/68 = 1.0	0.34 × 0.35 1.15 × 1.35	10			1, 2, 3
3	Л-160	30.0/46 = 0.6	0.10 × 0.15 2.65 × 2.20	20			1, 2
4	Л-108	85.1/128 = 0.7	0.25 × 0.23 1.36 × 1.03	10			1, 2

Примечание. $K_{уп}^*$ – количество уплощенных зерен МПГ от общего количества всех зерен. $CT_{ок}^{**}$ – степень окатанности зерен МПГ оценивалась по пятибалльной шкале А.В. Хабакова (1946): 1 – плохо окатанные с закругленными углами и ребрами; 2 – умеренно окатанные со сглаженными углами и ребрами, но с сохранившейся первоначальной формой граней; 3 – хорошо окатанные, округлые, без выраженных углов, ребер, граней.

Note. $K_{уп}^*$ – the number of flattened PGM grains from the total number of all grains. $CT_{ок}^{**}$ – degree of roundness of PGM grains was assessed on a five-point scale by A.V. Khabakov (1946): 1 – poorly rounded with rounded corners and edges; 2 – moderately rounded with smoothed corners and edges, but with the original shape of the faces preserved; 3 – well rounded, rounded, without pronounced corners, edges, faces.

за INCA Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments NanoAnalysis Ltd, UK).

Работы проводились при следующих режимах съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ; ток зонда – 1.6 нА; время набора спектра – 20–40 с. При данных условиях измерения разрешение рентгеновского спектрометра составляет 126–127 эВ на линии Mn K α , а размер зонда – 12 нм. Локальность анализа определяется размером области генерации рентгеновского излучения, которая достигает 3–5 мкм. Для количественного анализа подбирались участки зерен размером более чем 3 × 3 мкм. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда и калибровка спектрометра по энергии) применялся Co⁰. В качестве стандартов для большинства элементов использованы простые оксиды, чистые металлы и стехиометричные минералы (силикаты): кварц (Si, O), корунд (Al), Ti⁰, Fe⁰, Mn⁰, Co⁰, Ni⁰, диопсид (Ca, Mg), Cr₂O₃ (Cr), Ca₂P₂O₇ (P), альбит NaAlSi₃O₈ (Na), ортоклаз KAlSi₃O₈ (K), FeS₂ (S) и чистые металлы ЭПГ. Предел обнаружения для определяемых элементов находится в диапазоне 0.п–0.0п мас. %. Используемый метод позволяет в одном режиме устанавливать микротекстульные особенности зерен и одновременно определять весь спектр химических элементов их составов, а достигаемая точность является достаточной для решения поставленных задач (Zhmodik et al., 2016). Аналитические исследования проводились в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН “ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН” (аналитик Н.С. Карманов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Морфология МПГ

Детальное изучение зерен МПГ показало, что по своим размерам они относятся к мелким – 0.1–1.0 мм, реже средним – 1.0–2.0 мм – классам крупности. Средняя масса одного зерна платины колеблется в пределах 0.5–1.0 мг (см. табл. 1). Цвет зерен светло-серый. Форма преимущественно комковидная (рис. 2), часть зерен имеет уплощенную форму (см. табл. 1). Окатанность в основном средняя, присутствуют слабоокатанные зерна, практически неизменные, с частично сохранившимися собственными кристаллографическими формами. В большинстве случаев наблюдаются ксеноморфные границы зерен с мелкошагреневой, микроямчатой поверхностью. Иногда имеются углубления, напоминающие отпечатки вмещающих минералов. В нижнем течении р. Косьва (Л-84 и Л-134) встречаются единичные хорошо окатанные зерна.

Химический состав МПГ

Pt-Fe и *Pt-Fe(±Cu)* сплавы. Вся изученная платина относится к интерметаллидам Pt-Fe(±Cu) состава (рис. 3), которые относятся к изоферроплатине (Pt₃Fe) (пространственная группа *Fm3m*, содержание Fe 25–35 ат. %) и железистой платине (Pt,Fe) (пространственная группа *Pm3m*, содержание Fe 20–50 ат. %) (Cabri, Feather, 1975). Только на основе изучения составов, не используя данные рентге-

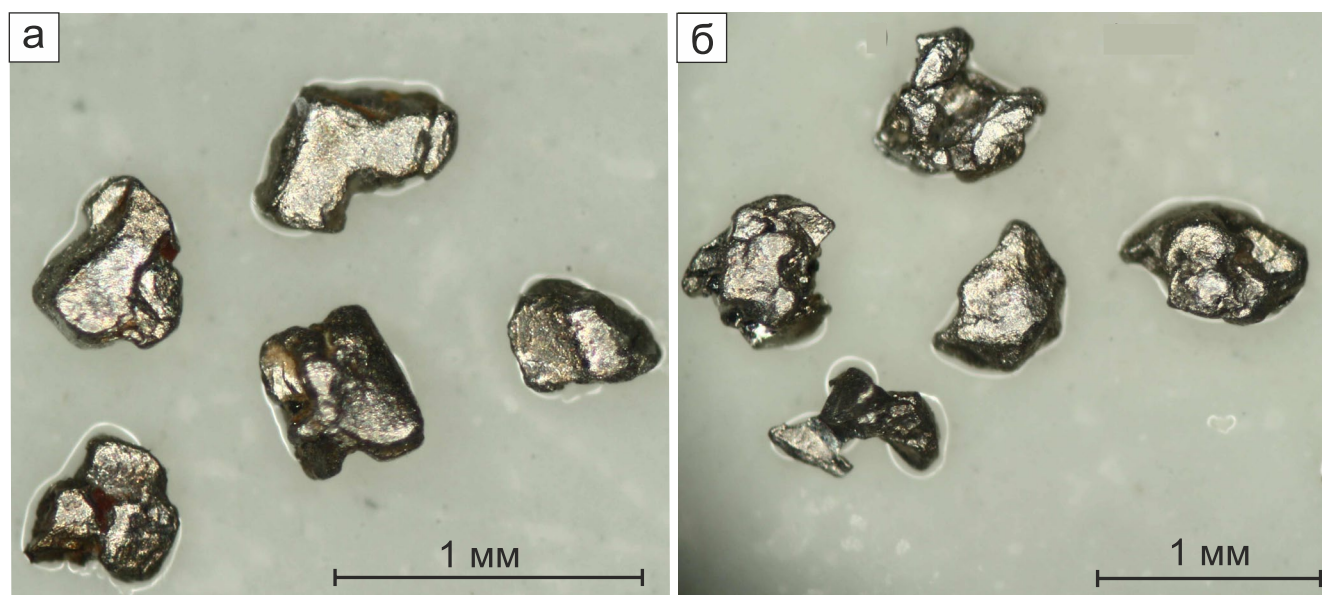


Рис. 2. Морфология зерен МПГ.

а – зерна платины из аллювиальных отложений р. Косьва, Л-160; б – зерна платины из аллювиальных отложений руч. Богатый Лог, Л-108.

Fig. 2. Morphology of PGM grains.

а – platinum grains from alluvial deposits of the river. Kosva, JL-160; б – platinum grains from alluvial deposits of the creek. Bogaty Log, JL-108.

нофазового анализа, нельзя однозначно классифицировать железистую платину и изоферроплатину, поэтому далее в тексте мы будем использовать обозначение *Pt-Fe сплав*. В качестве примеси в таких сплавах присутствует Cu, при этом ее концентрация несколько выше в менее железистых разновидностях. Составы первичных сплавов образуют на тройной диаграмме тренд от железистой платины до самородной платины (см. рис. 3). Состав Pt-Fe сплавов из россыпи руч. Богатый Лог менее железистый, здесь же встречаются зерна самородной платины с содержанием Fe до 3.5–5.5 мас. % и Cu до 1.5–3.5 мас. %. По первичным Pt-Fe сплавам развиваются вторичные Pt-Fe ± Cu сплавы, относящиеся к минералам ряда тетраферроплатина–туламинит. Они отличаются от магматических сплавов по составу и морфологии, образуя выделения неправильной формы и каймы замещения по магматическим Pt-Fe сплавам. Процесс замещения проявлен с разной степенью интенсивности – от тонких кайм до полного замещения первоначального зерна. В составе Pt-Fe сплавов отмечается постоянное присутствие Rh (0.36–1.41 мас. %), Pd (0.3–1.1 мас. %), Ir (0.9–8.9 мас. %) и Ru (0.28–0.76 мас. %) (табл. 2), содержание которых наследуется и фиксируется в тетраферроплатине и туламините в тех же количествах, что и в первичных зернах железоплатиновых сплавов.

По своему строению зерна подразделяются на однофазные, двух- и редко трехфазные (рис. 4). Они встречаются примерно в равных количествах. Однофазные зерна из р. Косьва сложены Pt-Fe сплавами (изоферроплатиной и железистой платиной), реже тетраферроплатиной и туламинитом (при полном псевдоморфизме). Двухфазные зерна из р. Косьва представлены несколькими разновидностями. Первая состоит из Pt-Fe сплава и тетраферроплатины (см. рис. 4 г-е), которая образует тонкие микронные ориентированные включения и каймы замещения (Л-160). Вторая разновидность – из Pt-Fe сплава и туламинита, который образует каймы (рис. 4ж). Третья – из тетраферроплатины и туламинита, который практически полностью замещает тетраферроплатину (рис. 4з). В последнем случае иногда наблюдаются и реликты первичного Pt-Fe сплава (трехфазные зерна) (рис. 4и). Границы между фазами могут быть четко выражены и легко визуальны различимы (см. рис. 4г, ж), а могут быть относительно размытыми (см. рис. 4з). Среди МПГ руч. Богатый Лог доминируют однофазные зерна Pt-Fe сплавов.

Os-Ir-(Ru) сплавы не образуют самостоятельных зерен, а встречаются только в минеральной ассоциации с Pt-Fe сплавами в виде включений. По номенклатуре (Harris, Cabri, 1991), они представлены самородным осмием (70–90 ат. %) и иридием

(60–85 ат. %) (рис. 5). В составе Os-Ir-(Ru) сплавов отмечается постоянная примесь Ru (ср. содержание 3.4 мас. %), наиболее высокие содержания которой отмечаются в самородном осмии, где содержание Ru изредка достигает значений 10–11 мас. % (табл. 3). Примеси Rh (ср. содержание 0.85 мас. %) и Pt (ср. содержание 4.9 мас. %) также фиксируются в составе, достигая наибольших значения в иридии (Rh до 1.6–3.2 мас. %, Pt до 10.69 мас. %). На диаграмме Os–Ru–Ir+(Pt,Fe,Rh) все точки составов представленных сплавов расположены вдоль осмий-иридиевого тренда составов гексагональных сплавов (см. рис. 5), что является характерным для сплавов этой системы из массивов урало-аляскинского типа (Лихачев и др., 1987; Толстых и др., 2011).

Микротекстуры МПГ

Микротекстуры изученных зерен МПГ в соответствии с их строением разбиваются на две группы: однородные (массивные) и неоднородные. Ко вторым относятся зерна с эмульсионно-вкрапленными текстурами, чаще рассеянными, реже – густовкрапленными, обусловленными наличием пластинчатых выделений Os-Ir±Ru состава (рис. 6). К этой же группе относятся зерна с ориентированными включениями тетраферроплатины в Pt-Fe сплаве (см. рис. 4д, е). Наиболее распространены зерна, в которых неоднородное строение обусловлено развитием кайм тетраферроплатины и туламинита, формирующих микрозональную, микропятнистую и каемочную микротекстуры (см. рис. 6в–е). Сами каймы туламинита некоторых массивных зерен сильно трещиноваты (см. рис. 6г–е). В кайме развивается сеть извилистых разнонаправленных микротрещин. Интенсивность микротрещиноватости растет к краю зерна. Иногда наблюдается “более грубая” микрокатаклизическая микротекстура (Исаенко, 1973), обусловленная продолжением микротрещин вглубь зерна (рис. 6д). Иногда обе микротекстуры отмечаются в одном зерне МПГ.

Микровключения МПГ

Микровключения наблюдаются во многих Pt-Fe(±Cu) сплавах. Надо отметить, что чаще они встречаются в зернах МПГ р. Косьва (в 70% зерен от общего числа), чем в зернах руч. Богатый Лог (менее 40% зерен от общего числа). Они представлены преимущественно включениями Os-Ir-Ru сплавов, форма которых напрямую зависит от их составов. Так, включения осмия представляют собой идиоморфные кристаллы, в то время как включения иридия имеют изометричную форму (рис. 7). Включения осмия обычно формируют крупные единичные вытянутые идиоморфные кристаллы пластинчатого или таблит-

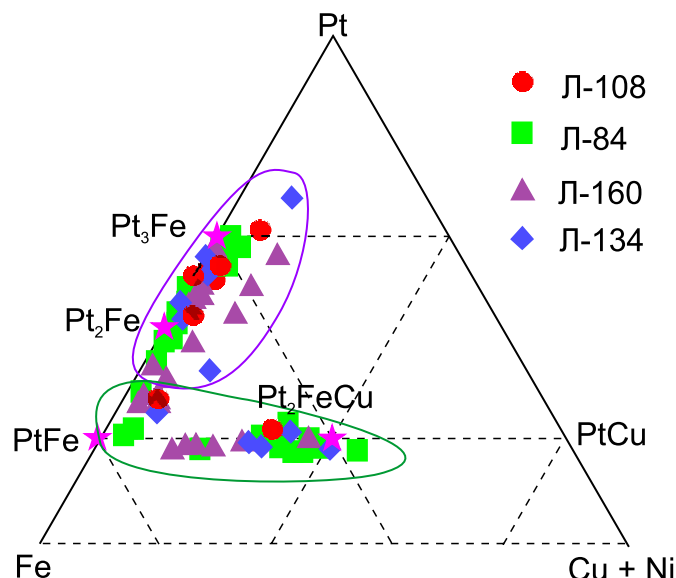


Рис. 3. Тройные диаграммы состава (ат. %) Pt-Fe сплавов (изоферроплатины и железистой платины) (фиолетовый контур) и вторичных Pt-Fe(±Cu) сплавов (минералов ряда тетраферроплатина-туламинит) (зеленый контур) из четырех участков аллювиальных отложений р. Косьва (Л-84, Л-134, Л-160) и руч. Богатый Лог (Л-108).

Fig. 3. Ternary diagrams of the composition of Pt-Fe alloys (isoferroplatinum and ferruginous platinum) (purple outline) and secondary Pt-Fe(±Cu) alloys (tetraferroplatinum-thulaminite) (green outline) from four areas of alluvial deposits of the river Kosva (Л-84, Л-134, Л-160) and stream Bogaty Log (Л-108).

чатчатого габитуса толщиной от 10 до 100 мкм и длиной 30–200 мкм (см. рис. 7а). Контакты между кристаллами осмия и вмещающей их матрицей Pt-Fe сплава имеют резкую, четкую границу. Как правило, пластинчатые выделения осмия расположены на границах зерен Pt-Fe сплава. Они могут располагаться под острым углом или лежать параллельно поверхности, как бы облекая вмещающее зерно Pt-Fe сплава. В некоторых случаях отчетливо наблюдается деформация пластинок осмия – их изгиб и разрушение. Однако при этом кристаллы осмия частично выступают за его пределы, сохраняя свою форму, что связано с более высокой устойчивостью осмия к механическому истиранию относительно остальных минералов. Похожая картина взаимоотношения крупных ламелей осмия в зерне изоферроплатины ранее описывалась, в частности, и для МПГ из габбро-клинопироксенит-дунитовых массивов Платиноносного пояса Урала (Bowles et al., 1995, 2018; Сидоров и др., 2012; Паламарчук и др., 2017, Козлов и др., 2019, Паламарчук, 2023).

Таблица 2. Химический состав некоторых Pt-Fe ($\pm$ Cu) сплавов р. Косьва и руч. Богатый Лог**Table 2.** Chemical composition of some Pt-Fe ($\pm$ Cu) alloys p. Kosva and stream Bogaty Log

МПГ	Pt-Fe сплавы							Твердые растворы тетраферроплатина-туламинит						
	Л-108	Л-84	Л-134	Л-160	Л-108	Л-84	Л-134	Л-160	Л-108	Л-84	Л-134	Л-160	Л-108	Л-84
Содержание, мас. %														
Fe	6.07	11.05	10.9	10.45	7.9	10.24	16.23	13.12	13.08	13.57	11.78	16.25	11.63	19.32
Ni	0.28	0.63	2.4	0.42	0	0.51	0.00	0.57	0.61	0.67	0.48	0.95	0.53	1.03
Cu	2.15	0.34	0.94	0.6	1.01	0.82	0.54	0.53	9.54	0.46	9.66	2.19	11	1.26
Pt	83.61	78.37	78.9	83.03	87.2	85.09	80.65	82.95	73.67	74.98	75.3	75.35	74.22	77.43
Pd	1.11	—	—	—	—	0.84	—	—	—	—	0.29	—	0.48	0.32
Os	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.9	—	—	—	—
Ru	0.76	—	0.72	—	—	—	—	—	0.51	—	—	—	0.28	0.37
Ir	4.84	8.98	3.35	4.73	2.78	1.14	2.89	1.65	0.95	8.03	—	3.77	1.51	0
Rh	0.72	1.08	1.16	0.58	0.5	0.81	0.45	0.93	1.41	0.47	1.12	0.36	0.64	0.87
Σ	99.54	100.44	98.37	99.81	99.39	99.45	99.76	99.75	99.77	99.08	98.63	98.87	100.29	100.6
Содержание, ат. %														
Fe	17.36	29.41	28.26	28.37	22.70	27.66	39.73	33.76	29.42	34.86	27.24	38.75	26.29	43.5
Ni	0.76	1.6	5.92	1.08	0.00	1.31	0.00	1.4	1.31	1.64	1.06	2.16	1.14	2.21
Cu	5.4	0.8	2.14	1.43	2.55	1.95	1.16	1.2	18.86	1.04	19.63	4.59	21.85	2.49
Pt	68.46	59.7	58.54	64.53	71.69	65.8	56.49	61.11	47.44	55.14	49.84	51.43	48.02	49.9
Pd	1.67	—	—	—	—	1.19	—	0	—	0	0.35	—	0.57	0.38
Os	—	—	—	—	—	—	—	0	—	0.68	—	—	—	—
Ru	1.2	—	1.03	—	—	—	0.00	—	0.63	—	—	—	0.35	0.46
Ir	4.02	6.94	2.49	3.73	2.29	0.89	2.02	1.23	0.62	5.99	—	2.61	0.99	0
Rh	1.12	1.56	1.63	0.85	0.78	1.19	0.60	1.3	1.72	0.66	1.41	0.47	0.79	1.06

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. The dash is below the detection limit.

Реже наблюдаются множественные тонкие микронные тонкопластинчатые субпараллельные выделения осмия в иридии (рис. 7б, в). При этом такие игольчатые ламели имеют предпочтительную ориентацию и пересекаются друг с другом под углом 55–60°, что указывает на кристаллографический контроль.

Морфология включений иридиевого состава разнообразна. Наиболее широко распространены мелкие (до 5–7 мкм) множественные изометричные включения иридия, являющиеся продуктами распада Pt-Fe-Ir твердого раствора (см. рис. 7г). Аналогичные структуры распада описаны для платиновых минералов Нижнетагильского массива (Рамдор, 1962). Стоит отметить, что состав таких Pt-Fe сплавов характеризуется повышенным содержанием иридия. Встречаются относительно крупные (до 10 мкм) обособления неправильной формы, преимущественно расположенные вокруг одиночных кристаллов-вкрапленников осмия. Для этих включений иридия обычно характерна субмикронная эмульсионная вкрапленность Pt-Fe состава, образовавшаяся

в результате распада твердого раствора, иногда совместно с тонкопластинчатыми включениями осмия, описанными выше (см. рис. 7в, д).

Часть зерен Pt-Fe сплавов подвержена замещению минералами ряда тетраферроплатина (PtFe)–туламинит (Pt₂FeCu), которые формируют каймы вокруг зерен Pt-Fe сплава. В некоторых зернах наблюдаются картины постепенного замещения первичных Pt-Fe сплавов до почти полного их преобразования и формирования псевдоморфоз тетраферроплатины и туламинита. В зернах Pt-Fe сплава встречаются ориентированные ламели тетраферроплатины, которые развиваются вдоль трещин спайности по направлениям (111) и (100). Кроме того, отмечаются более поздние включения и «пятна» тетраферроплатины, развивающиеся вдоль деформационных текстур и по трещинам спайности (Бетехтин, 1935, Tolstikh et al., 2015) (см. рис. 7е).

Встречаются микровключения сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ: лаурита-эрликманита, ирарсита (рис. 8а, б; табл. 4). Они приурочены к трещинам и каймам зерен. Лаурит образует крупные

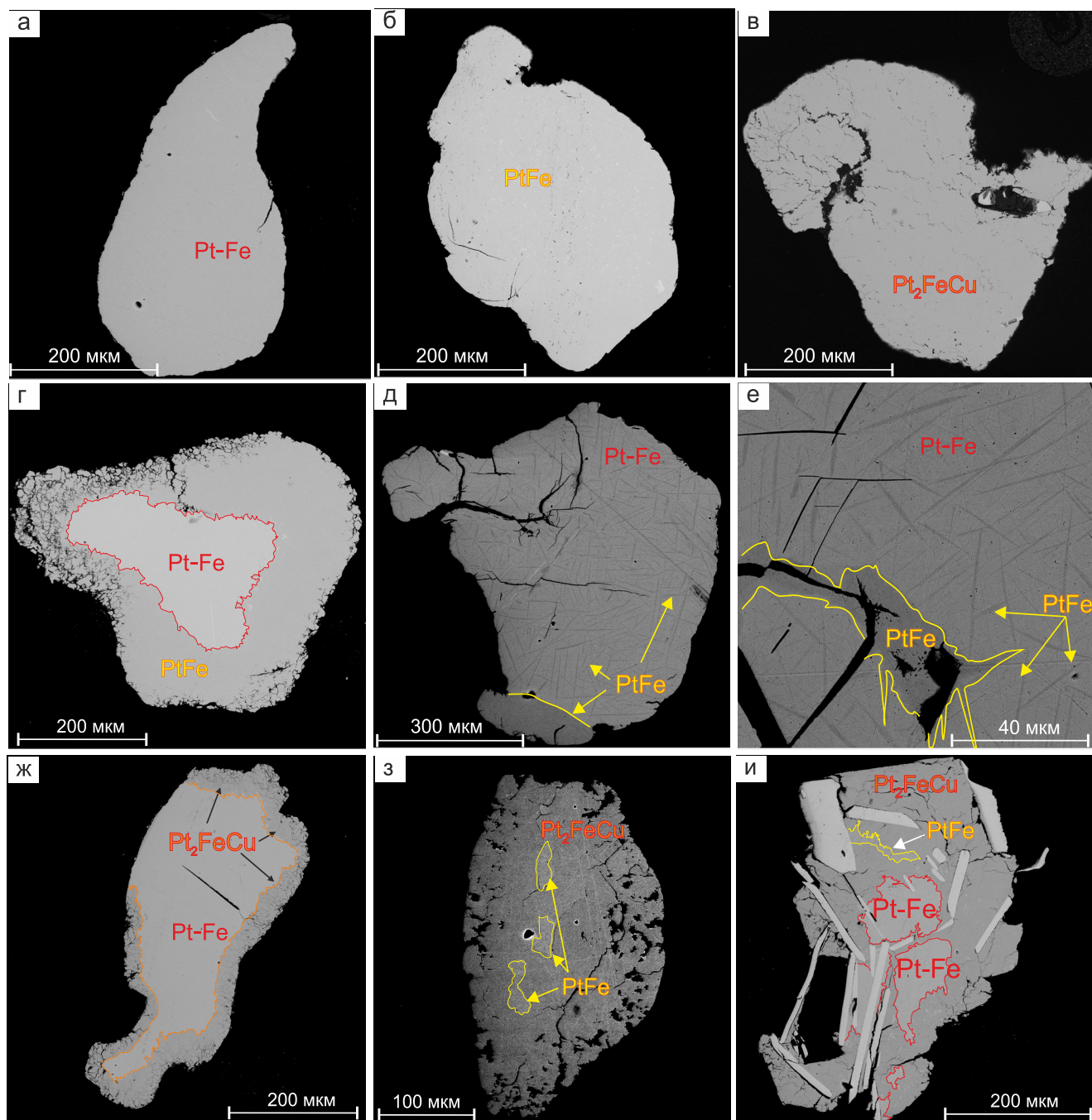


Рис. 4. Снимки СЭМ (здесь и далее в режиме обратнорассеянных электронов) однофазных (а–в), двухфазных (г–з) и трехфазных (и) зерен МПГ.

а, б – зерна Pt-Fe сплава; в – туламинит; г – Pt-Fe сплав с каймой тетраферроплатины; д – Pt-Fe сплав с каймой тетраферроплатины; е – Pt-Fe сплав с ламелями тетраферроплатины; ж – Pt-Fe сплав с каймой туламинита; з – тетраферроплатина с каймой туламинита; и – зерно Pt-Fe сплава с каймой тетраферроплатины и туламинита.

Fig. 4. SEM images (here in after in backscattered electron mode) of single-phase grains (а–в), two-phase (г–з) and three-phase (и) PGM grains.

а, б – Pt-Fe alloy; в – tulamine; г – Pt-Fe alloy with a tetraferroplatine border; д – Pt-Fe alloy with a tetraferroplatine border; е – Pt-Fe alloy with tetraferroplatine lamellae; ж – Pt-Fe alloy with a tulamine border; з – tetraferroplatine with a tulamine border; и – grain Pt-Fe alloy, bordered with tetraferroplatin and tulamine.

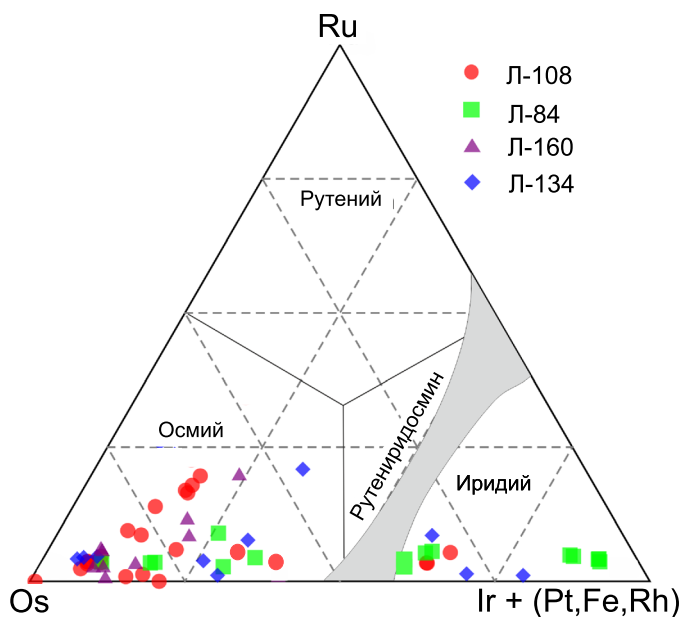


Рис. 5. Составы Os-Ir-(Ru) сплавов (ат. %) из четырех участков аллювиальных отложений р. Косьва (Л-84, Л-134, Л-160) и руч. Богатый Лог (Л-108) на диаграмме Os-Ru-Ir + (Pt, Fe, Rh).

Серая область – зона несмесимости гексагональных и кубических сплавов.

Fig. 5. Compositions of Os-Ir-(Ru) alloys (at. %) from four areas of alluvial deposits of the river Kosva (Л-84, Л-134, Л-160) and stream Bogaty Log (Л-108) on the Os-Ru-Ir + (Pt, Fe, Rh) diagram.

The shaded area – hexagonal and cubic alloy immiscibility zone.

включения до 20 мкм, иногда идиоморфные. В некоторых таких включениях наблюдается зональность, обусловленная изменением содержания Os (эрликманитового минала) в составе лаурита. В химическом составе ирарсита отмечается повышен-

Таблица 3. Химический состав Os-Ir-(Ru) сплавов р. Косьва и руч. Богатый Лог

Table 3. Chemical composition of Os-Ir-(Ru) alloys of the Kosva and Ruch rivers Rich Log

Эле- мент	Os-Ir(-Ru) сплавы								Ir-Os(-Ru) сплавы							
	Л-108		Л-134		Л-84		Л-160		Л-108		Л-134		Л-84		Л-160	
Содержание, мас. %																
Fe	0.00	0.17	0.27	0.00	0.27	0.22	0.79	0.00	0.21	0.24	0.39	3.92	0.67	0.91	0.59	0.29
Ni	0.00	0.26	0.40	0.26	0.40	0.29	0.43	0.35	0.27	0.29	0.36	0.44	0.44	0.00	0.36	0.00
Cu	0.00	0.00	0.22	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pt	2.59	0.00	2.41	0.11	2.41	1.55	4.21	0.00	10.69	10.26	10.73	0.55	0.73	10.11	7.73	4.90
Ru	5.76	10.34	2.40	5.11	2.40	2.41	8.85	1.55	1.79	1.82	0.00	3.13	4.37	2.03	0.00	0.50
Rh	0.94	0.91	0.38	0.38	0.38	0.36	0.58	0.29	1.04	1.28	0.11	0.55	0.73	2.99	0.50	0.00
Pd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	1.39	1.58	0.00	1.53	0.00
Os	79.03	69.42	90.16	72.47	70.16	62.95	75.48	86.76	33.90	34.05	33.84	28.62	28.36	8.16	35.84	39.00
Ir	10.80	16.47	4.21	22.12	24.21	33.77	9.49	10.48	51.94	52.31	53.27	61.92	64.94	76.69	51.27	54.00
Σ	99.12	97.40	100.45	101.45	100.45	101.55	99.83	99.43	99.84	100.25	100.23	100.52	101.82	100.89	97.82	98.69
Содержание, ат. %																
Fe	0.00	0.53	0.89	0.00	0.89	0.72	2.50	0.00	0.76	0.86	1.42	11.6	2.09	3.17	2.13	1.04
Ni	0.00	0.78	1.26	0.81	1.27	0.91	1.30	1.07	0.94	1.00	1.26	1.25	1.31	0.00	1.24	0.00
Cu	0.00	0.00	0.64	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pt	0.25	0.00	0.23	0.01	0.23	0.15	0.38	0.00	1.11	1.06	1.12	0.04	0.07	1.01	0.80	0.50
Ru	10.57	17.97	4.40	9.11	4.41	4.39	15.55	2.76	3.61	3.63	0.00	5.17	7.56	3.92	0.00	0.99
Rh	1.69	1.55	0.68	0.67	0.69	0.64	1.00	4.21	2.06	2.51	0.22	0.89	1.24	5.67	0.98	0.00
Pd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.94	2.18	2.60	0.00	2.90	0.00
Os	77.08	64.13	87.84	68.69	68.51	60.90	70.50	82.14	36.39	36.11	36.40	25.11	26.09	8.38	35.97	41.15
Ir	10.41	15.04	4.05	20.73	23.37	32.30	8.76	9.81	55.12	54.84	56.64	53.70	59.05	77.85	55.98	56.32

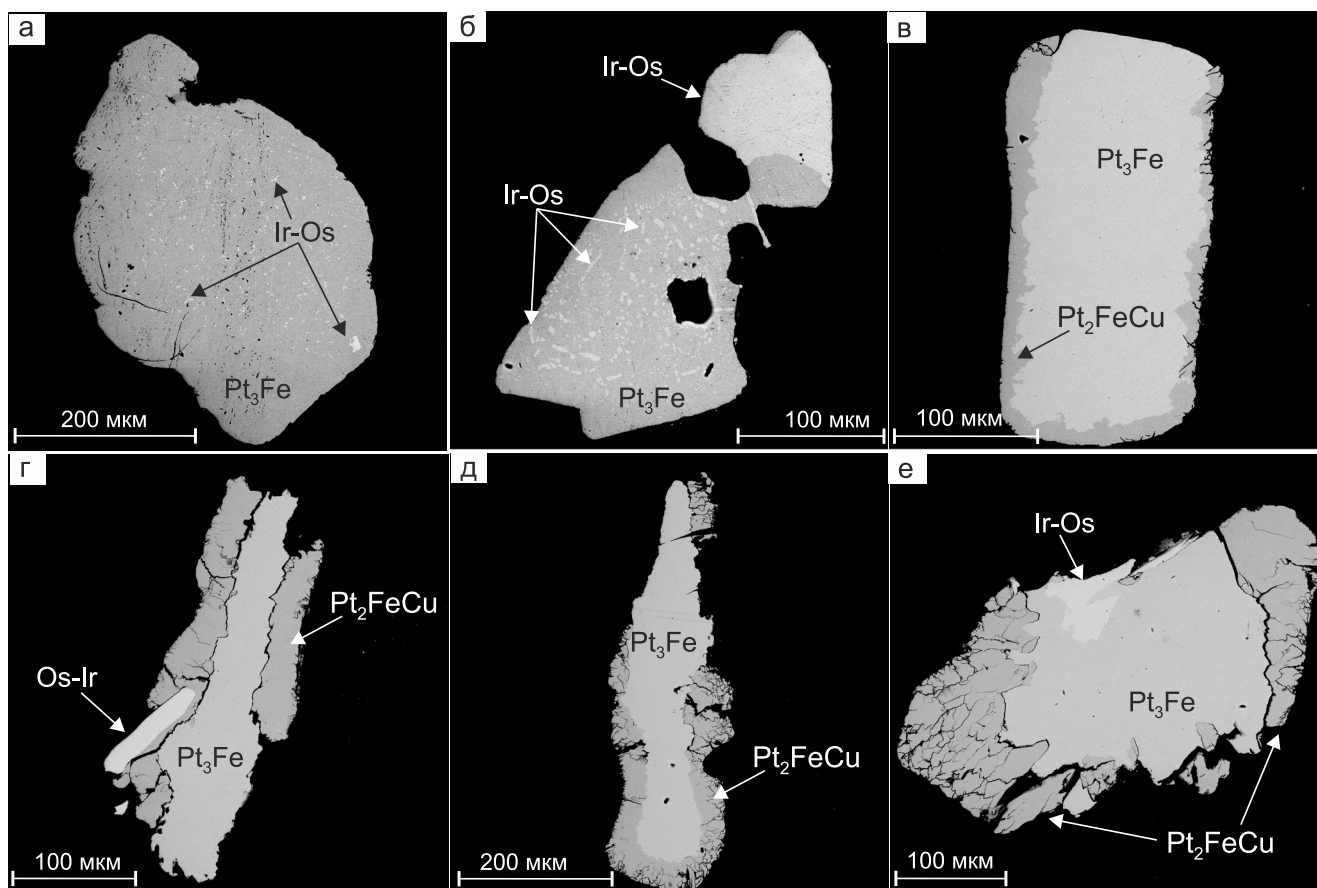


Рис. 6. Снимки СЭМ микровкрапленных (а, б) и каемочных (в–е) микротекстур зерен МПГ.

а – зерно Pt-Fe сплава с микронными ламелями Ir-Os состава; б – зерно Pt-Fe сплава с ламелями и включениями Ir-Os состава; в – Pt-Fe сплав с тонкой каймой туламинита; г – Pt-Fe сплав с массивной каймой туламинита и включением Os-Ir состава; д – кайма туламинита с микротрещиноватой текстурой; е – микрокатакластическая текстура каймы туламинита.

Fig. 6. SEM images of micro-disseminated (a, б) and rim structures (b–e) PGM grains.

а – grain of Pt-Fe alloy with micron lamellas of Ir-Os composition; б – grain of Pt-Fe alloy with lamellas and inclusions of Ir-Os alloy; в – Pt-Fe alloy with a thin rim of tulaminitite; г – Pt-Fe alloy with a massive tulaminitite rim and inclusion of Os-Ir composition; д – tulaminitite rim with a microcracked structure; е – microcataclastic structure of the tulaminitite rim.

ное содержание Rh – до 11.2 мас. %. Важно также отметить наличие большого количества микрополостей, ранее, предположительно, заполненных, судя по их огранке, идиоморфными кристаллами гексагонального осмия (см. рис. 8г).

В одном из зерен туламинита установлены не названные МПГ – интерметаллиды олова, родия, меди, палладия и платины. Они образуют изометричные включения от 2 до 10 мкм в краевой части зерна туламинита (см. рис. 8в). В этих интерметаллидах отмечаются вариации содержания Rh (14–41 мас. %) и Pd (7–24 мас. %) с Pt (5–24 мас. %) при постоянном количестве Cu и Sn. Установлено две разновидности соединения. В первой содержание Rh достигает 14–15 мас. % при Pd 20–23 мас. % и Pt 18–24 мас. % (табл. 5 (1, 2)). Во второй

разновидности содержание Rh значительно выше (34–41 мас. %) при уменьшении доли Pd (6–9 мас. %) и Pt (6–11 мас. %) (табл. 5 (4–8)). При этом надо отметить, что примеси родия и палладия в составе первичных и вторичных Pt-Fe(±Cu) сплавах редко достигают 1 мас. %. При расчете полученных составов получено соотношение, близкое к $Rh + Pd + Pt + Cu = 3Sn$, в первом с преобладанием палладия, во втором – родия. Из существующих и описанных ранее минеральных фаз такое соотношение характерно для таймырита $(Pd, Cu, Pt)_3Sn$, однако ранее примеси родия в его составе не отмечались (Barkov et al., 2000; Кузьмин, Калугин, 2021). Согласно рассчитанной кристаллохимической формуле можно предположить, что данный интерметаллид, возможно, является структурным

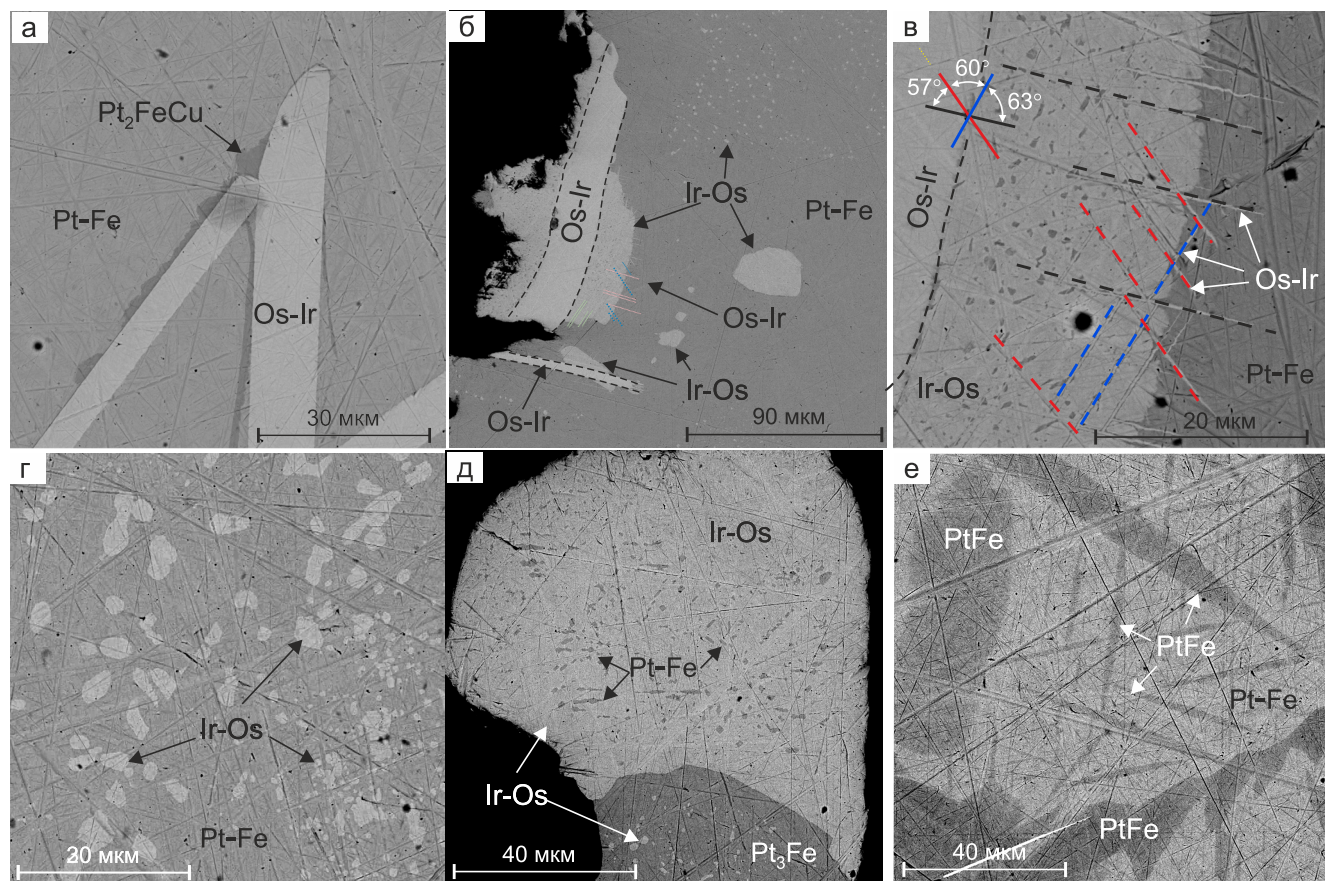


Рис. 7. Снимки СЭМ зерен Pt-Fe сплава с включениями Os-Ir-(Ru) сплавов.

а – единичные зерна осмия; б – взаимоотношение кристаллов осмия и включений иридия; в – субпараллельные тонкие пластинчатые включения осмия во включении иридия; г – округлые включения и эмульсионная вкрапленность иридия; д – включение иридия со “строчными” включениями Pt-Fe сплава; е – ламели тетраферроплатины в Pt-Fe сплаве, вдоль которых происходит замещение и образуются “пятна” тетраферроплатины.

Fig. 7. SEM images of isoferroplatinum grains with inclusions of Os-Ir-Ru alloys.

а – single grains of osmium; б – relationship between osmium crystals and iridium inclusions; в – subparallel thin plate-like inclusions of osmium in an inclusion of iridium; г – rounded inclusions and emulsion impregnation of iridium; д – inclusion of iridium with “lowercase” inclusions of Pt-Fe alloy; е – lamellas of tetraferroplatinum in Pt-Fe alloy, along which substitution occurs and “spots” of tetraferroplatinum are formed.

родиевым аналогом таймырита $(\text{Pd,Cu,Pt})_3\text{Sn}$, вероятно, с изоморфным замещением Pd и Pt родием.

В другом зерне туламинита установлены сразу несколько интересных проявлений платиновой минерализации. В нем обнаружены единичные включения томамаэита – Cu_3Pt (tomamacite) (см. рис. 8е) (Nishio-Hamane, Saito, 2020). Включения томамаэита достигают 3–5 мкм и имеют изометричные, реже таблитчатые формы (см. рис. 8г, е). Состав томамаэита близок к идеальной формуле Cu_3Pt , он содержит незначительные примеси Fe (до 1.18 мас. %) и Ni (до 0.56 мас. %), а также Rh (до 0.27 мас. %), Ru (до 0.26 мас. %) (табл. 6). Включения фазы Cu_3Pt ранее описаны для ассоциаций МПГ Нижнетагильского и Вересовоборского массивов

(Степанов, 2015). Похожая картина описана Кузьминым с соавторами для ассоциации вторичных Pt-Fe интерметаллидов из клинопироксенит-дунитового массива Желтая Сопка на Северном Урале (Кузьмин и др., 2020). По краю этого зерна в трещине туламинита развивается самородная высокопробная платина. Она образует кайму в 3–5 мкм и заполняет трещинки (см. рис. 8д). В ее химическом составе отмечается постоянное незначительное количество примесей Pd, Cu, Fe и Ni (табл. 7). В этом же зерне встречены сложные оксиды ЭПГ с преобладанием в составе Ir, Ru и Pt, которые по стехиометрическим соотношениям соответствуют HO_2 . Подобные оксиды отмечались и ранее на Урале (Garuti et al., 1997; Толстых и др., 2011; Сидо-

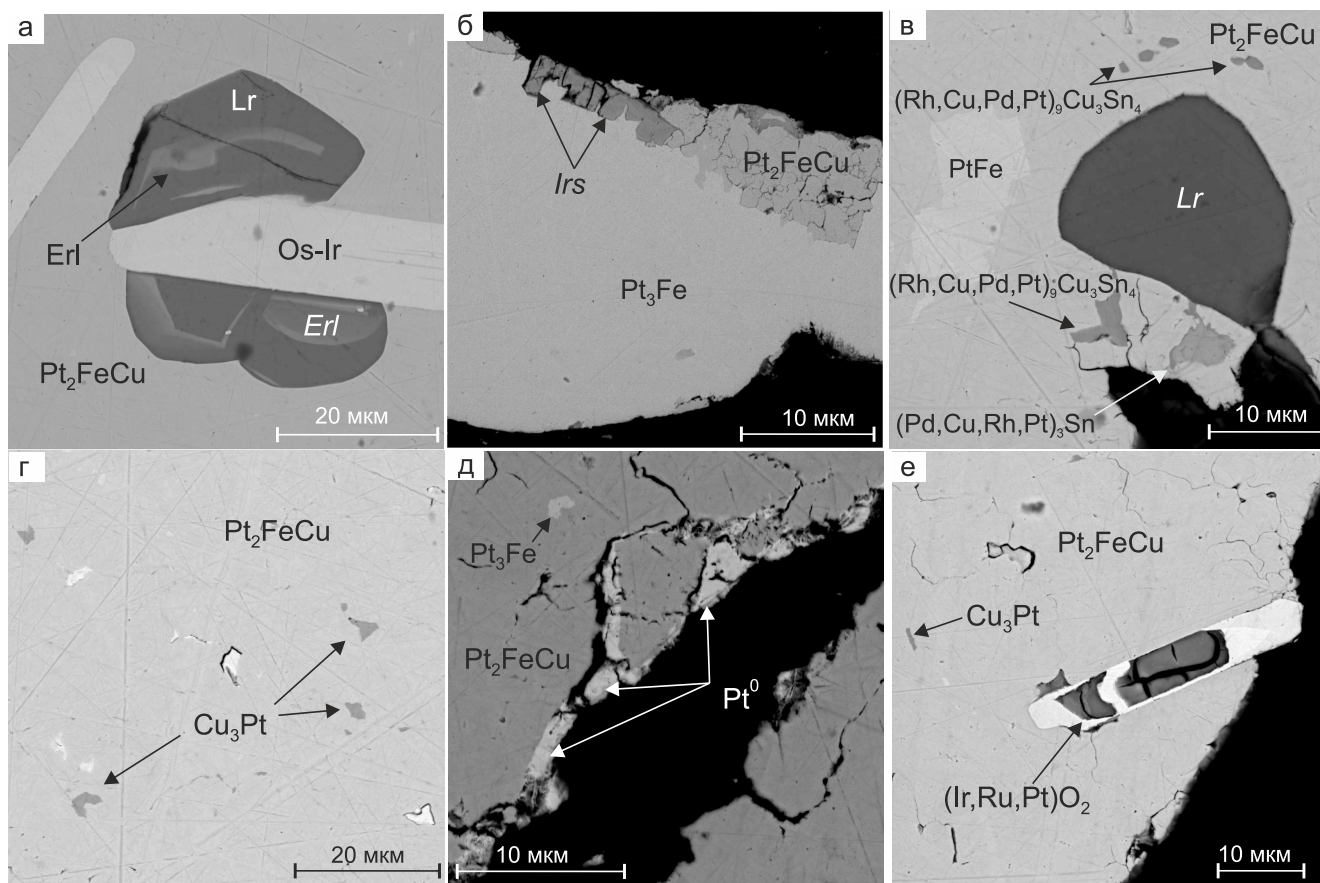


Рис. 8. Снимки СЭМ включений МПГ в зернах Pt-Fe(±Cu) сплавов.

а – зональное включение лаурита-эрликманита вокруг ламели Os-Ir в туламините; б – включение ирарсита в кайме туламинита Pt-Fe сплава; в – включения неназванного интерметаллида (Rh-Pd-Cu-Pt-Sn) в туламините; г – включения томамазита Cu_3Pt и Pt-Fe сплава в туламините; д – самородная платина в трещине в зерне туламинита; е – Ir-содержащая оксидная фаза – $(\text{Ir,Ru,Pt})\text{O}_2$, развитая по кристаллу Os-Ir. Erl – эрликманит, Lr – лаурит, Irs – ирарсит.

Fig. 8. SEM images of PGM inclusions in grains of Pt-Fe(±Cu) alloys.

а – zonal inclusion of laurite-erlikmanite around the Os-Ir lamella in tulaminitite; б – inclusion of irarsite in the rim of tulaminitite in isoferroplatinum; в – inclusions of an unnamed intermetallic compound (Rh-Pd-Cu-Pt-Sn) in tulaminitite; г – inclusions of Cu_3Pt tomamite and Pt-Fe alloy in tulaminitite; д – native platinum in a crack and along the edge in a tulaminitite grain; е – Ir-containing oxide phase $(\text{Ir,Ru,Pt})\text{O}_2$ that develops along Os-Ir alloys in a tulaminitite grain. Erl – erlikmanite, Lr – laurite, Irs – irarsite.

ров и др., 2012). Они располагаются в зонах микро-трещиноватости и тесно ассоциируют с ламелями осмия (см. рис. 8е), возможно, замещают их. Полученные при анализе суммы меньше 100 мас. % (табл. 8), что может указывать на присутствие в соединении (ОН)-групп (Gornostayev et al., 1999) или быть следствием трещиноватости, характерной для подобных оксидов (Ahmed, Arai, 2003). Помимо основных элементов, при анализе установлены в небольших количествах Fe (до 5.69 мас. %) и Rh (до 3.24 мас. %). Остальные элементы содержатся в незначительных количествах (около 1 мас. % и менее) и, вероятно, являются примесными в результате нахождения в микротрещинах гетита, каолинита и пр.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по составу зерен МПГ из аллювия р. Косьва и руч. Богатый Лог хорошо согласуются с классическим положением об унаследованном характере таких ассоциаций в россыпях ближнего сноса, в том числе и Урала (Баранников, Осовецкий, 2014; Степанов, 2018; Stepanov et al., 2019; и др.). Аллювиальная ассоциация изученных МПГ представлена Pt-Fe интерметаллидами, что характерно для большинства КЗУМов Урала (Малич и др., 2011; Паламарчук и др., 2017; Толстых и др., 2011; Степанов и др., 2020, 2021). Проявления хром-платиновой минерализации в Кытлымском и Нижне-Тагильском КЗумах описаны в целом ря-

Таблица 4. Состав микровключений лаурита (1–4) и ирарсита (5) в Pt-Fe сплаве по данным СЭМ-ЭДС, мас. %**Table 4.** Composition of microinclusions of laurite (1-4) and irarsite (5) in Pt-Fe alloy according to SEM-EDS data, wt %

№ обр.	S	As	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Сумма
1	38.40	–	54.16	0	0	2.61	3.63	0	98.68
2	38.88	–	56.02	0	0	4.28	0.72	0	99.90
3	35.89	–	43.85	1.01	0	16.24	2.2	0	99.19
4	39.16	–	56.59	0	0	1.55	0.99	0	98.29
Формула									
1	$(\text{Ru}_{0.91}\text{Ir}_{0.03}\text{Os}_{0.02})_{0.96}\text{S}_{2.04}$								
2	$(\text{Ru}_{0.93}\text{Os}_{0.04}\text{Ir}_{0.01})_{0.97}\text{S}_{2.03}$								
3	$(\text{Ru}_{0.79}\text{Os}_{0.15}\text{Ir}_{0.02}\text{Rh}_{0.02})_{0.98}\text{S}_{2.02}$								
4	$(\text{Ru}_{0.93}\text{Os}_{0.02}\text{Ir}_{0.01})_{0.96}\text{S}_{2.04}$								
	S	As	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Сумма
5	12.53	23.43	1.86	11.24	0	0.33	47.79	0.89	98.38
Формула									
5	$(\text{Ir}_{0.92}\text{Rh}_{0.3}\text{Ru}_{0.05}\text{Pt}_{0.001}\text{Os}_{0.004})_{1.02}\text{As}_{0.92}\text{S}_{1.06}$								

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. The dash is below the detection limit.

Таблица 5. Состав микровключений интерметаллида родия, меди и палладия (Rh,Pd,Cu,Pt)₃Sn по данным СЭМ-ЭДС, мас. %**Table 5.** Composition of microinclusions of rhodium, copper and palladium intermetallic compound (Rh,Pd,Cu,Pt)₃Sn according to SEM-EDS data, wt %

№ обр.	Fe	Cu	Rh	Pd	Sn	Sb	Te	Pt	Сумма
1	0.41	14.33	15.47	23.92	25.92	–	–	17.82	97.87
2	0.59	14.58	14.46	21.48	25.26	–	–	24.36	100.73
3	1.09	15.09	39.85	7.98	28.13	1.18	0.91	5.78	100.01
4	0.58	15.45	41.05	9.05	29.90	0.77	0.60	5.05	102.45
5	2.40	14.86	34.30	7.16	23.91	0.94	0.63	13.84	98.04
6	2.04	14.72	34.68	6.51	26.71	–	–	11.70	96.36
7	0.75	15.25	40.72	8.99	28.91	–	–	5.53	100.15
8	1.07	14.93	36.25	5.75	26.97	–	–	6.92	91.89
Формула									
1	$(\text{Pd}_{0.98}\text{Cu}_{0.98}\text{Rh}_{0.66}\text{Pt}_{0.39}\text{Fe}_{0.03})_{3.05}\text{Sn}_{0.95}$								
2	$(\text{Pd}_{0.97}\text{Cu}_{0.94}\text{Rh}_{0.61}\text{Pt}_{0.5}\text{Fe}_{0.05})_{3.07}\text{Sn}_{0.93}$								
3	$(\text{Rh}_{1.5}\text{Cu}_{0.9}\text{Pd}_{0.4}\text{Pt}_{0.1}\text{Fe}_{0.07})_{2.97}(\text{Sn}_{0.96}\text{Sb}_{0.04}\text{Te}_{0.03})_{1.03}$								
4	$(\text{Rh}_{1.6}\text{Cu}_{0.9}\text{Pd}_{0.3}\text{Pt}_{0.1}\text{Fe}_{0.05})_3(\text{Sn}_{0.96}\text{Sb}_{0.02}\text{Te}_{0.02})_1$								
3	$(\text{Rh}_{1.38}\text{Cu}_{0.95}\text{Pt}_{0.29}\text{Pd}_{0.27}\text{Fe}_{0.07})_{3.03}(\text{Sn}_{0.92}\text{Sb}_{0.03}\text{Te}_{0.02})_{0.97}$								
6	$(\text{Rh}_{1.42}\text{Cu}_{0.97}\text{Pd}_{0.26}\text{Pt}_{0.25}\text{Fe}_{0.15})_{3.05}\text{Sn}_{0.95}$								
7	$(\text{Rh}_{1.57}\text{Cu}_{0.95}\text{Pd}_{0.34}\text{Pt}_{0.11}\text{Fe}_{0.05})_{3.03}\text{Sn}_{0.97}$								
8	$(\text{Rh}_{1.53}\text{Cu}_{1.02}\text{Pd}_{0.23}\text{Pt}_{0.15}\text{Fe}_{0.08})_{3.02}\text{Sn}_{0.98}$								

Таблица 6. Химический состав томамаэита из включений в зерне туламинита (обр. Л-134-26) из платиноносной россыпи р. Косьва

Table 6. Chemical composition of tomamaeite from inclusions in tulaminite grain (Sample Л-134-26) from the platinum-bearing placer of the river Kosva

№ обр.	Fe	Ni	Cu	Ru	Rh	Pt	Сумма
1	0.02	0.29	48.33	0.27	0.25	49.13	98.50
2	0.17	0.56	45.56	0.25	0.27	51.47	99.29
3	–	–	49.42	0	0	50.58	100.00
Формула							
1	$(\text{Cu}_{2.97}\text{Fe}_{0.001}\text{Ni}_{0.02})_{2.99}(\text{Pt}_{0.99}\text{Rh}_{0.01}\text{Ru}_{0.01})_{1.01}$						
2	$(\text{Cu}_{2.9}\text{Fe}_{0.001}\text{Ni}_{0.04})_{2.94}(\text{Pt}_{1.04}\text{Rh}_{0.01}\text{Ru}_{0.01})_{1.06}$						
3	Cu_3Pt						

Примечание. Образцы 1, 2 – данные авторов, зерно из россыпи р. Косьва (Л-134-26); 3 – данные с сайта www.mineralatlas.eu. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Samples 1, 2 – data from the authors, grain from the placer of the Kosva river (Л-134-26), 3 – data from the website www.mineralatlas.eu. The dash is below the detection limit.

Таблица 7. Состав высокопробной платины по данным СЭМ-ЭДС

Table 7. Composition of high-grade platinum according to SEM-EDS data

№ обр.	Fe	Ni	Cu	Ru	Pd	Ir	Pt	Сумма
мас. %								
1	0.56	0.35	1.35	0	0.42	0	95.12	97.8
2	0.6	0.15	1.08	0	0.68	0	95.16	97.67
3	0.42	0.33	1	0.24	0.75	0	94.87	97.62
4	0.43	0.35	1.12	0	0.8	0	95.42	98.12
ат. %								
1	1.90	1.13	4.02	0	0.75	0	92.21	100
2	2.05	0.49	3.24	0	1.22	0	93.01	100
3	1.43	1.07	3.00	0.45	1.34	0	92.70	100
4	1.46	1.13	3.34	0	1.42	0	92.65	100

де публикаций, также предложены модели формирования таких рудных зон в дунитах (Ефимов, Ефимова, 1967; Малахов, Малахова, 1970; Иванов, 1997; Пушкарёв, 2000; Пушкарёв и др., 2007; и др.). В нашем случае питающими коренными источниками для россыпей служат породы Кытлымского КЗУМа, Косвинского дунит-клинопирокенит-габбрового комплекса, в которых установлены изоферроплатина и тетраферроплатина состава Fe,Ni-Pt(Ir,Pd,Rh)-Cu (мас. %): 1) 11.6–88.58–0.89, 2) 10.5–86.75–0.57, 3) 13.4–83.2–2.09 (Пушкарёв и др., 2007; Garuti et al., 2002). Содержание примесных ЭПГ в Fe-Pt сплавах из коренных пород варьируется, достигая Rh – 1.15 мас. %, Ir – 1.4 мас. %, Pd – 0.5 мас. %, тогда как Ru и Os практически отсутствуют. Этот состав близок к составу

в Pt-Fe сплавов и тетраферроплатины изученных россыпей (см. табл. 2) и соответствует формульному стехиометрическому составу: 1) $\text{Pt}_3(\text{Fe,Ni,Cu})$, 2) $\text{Pt}_{2.5}(\text{Fe,Ni,Cu})_{1.5}$, 3) $\text{Pt}(\text{Fe,Ni,Cu})$. Таким образом, прослеживаются почти все промежуточные составы интерметаллидов между железистой платиной и изоферроплатиной, что свидетельствует о понижении фугитивности кислорода в ходе эволюции рудоформирующей системы (Amosse et al., 2000). Содержание примесных элементов в изученных сплавах Pt-Fe при достаточно широком разнообразии составов показывает тенденцию к обогащению Ir и Rh относительно Pd (рис. 9). Подобная картина в целом совпадает с распределением второстепенных элементов в изоферроплатине, связанным с расслоенными интрузиями урало-аля-

Таблица 8. Состав оксида ЭПГ

Table 8. Composition of PGE oxide

Элемент	мас. %		Форм. ед.	
	Включ. 1	Включ. 2	Включ. 1	Включ. 2
Pt	9.51	6.63	0.062	0.044
Ir	28.7	30.65	0.189	0.206
Ru	13.14	14.48	0.164	0.185
Rh	2.52	3.24	0.031	0.041
Os	0.77	0.31	0.005	0.002
As	2.94	0.72	0.050	0.012
Cu	0.68	0.27	0.014	0.005
Ni	0.37	0.24	0.008	0.005
Fe	5.69	4.4	0.129	0.102
Mn	0.1	1.44	0.002	0.034
V	0.28	0.55	0.007	0.014
Ti	0.56	2.09	0.015	0.056
Ca	1.74	2.02	0.055	0.065
S	0.1	0.98	0.004	0.040
Si	1.02	1.01	0.046	0.047
Al	0.83	0.89	0.039	0.043
Na	0.96	—	0.053	0.000
O	26.81	25.78	2.13	2.10
Сумма	96.72	95.7	3	3

Примечание. Полу жирным выделены преобладающие компоненты в составе оксида.

Note. The predominant components in the composition of the oxide are highlighted in bold.

скинского типа (Tolstykh et al., 2002). Известно, что повышенные концентрации иридия в железоплатиновых твердых растворах характерны для хромитов и дунитов зональных массивов (Malitch, Thalhammer, 2002; Малич и др., 2011).

В россыпных МПГ просматривается много признаков, свойственных МПГ из питающих источников, охарактеризованных ранее в литературе. К общим типоморфным признакам, кроме состава, следует отнести существование включений Os-Ir сплавов в Pt-Fe матрице; включения сульфидов и сульфосеннидов ЭПГ; замещение первичных магматических Pt-Fe сплавов вторичными минералами ряда тетраферроплатина–туламинит как по ослабленным зонам, так и с формированием кайм замещения. Вероятно, именно хромититы из эродированных серпентинизированных дунитов западных склонов Кытлымского КЗУМа (Сосновское и Косвинское дунитовые тела) являются основными питающими областями сноса для россыпей р. Косьва и руч. Богатый Лог. Исследование типоморфных особенностей и онтогении зерен МПГ позволяет сделать вывод о длительной многоэтапной истории их формирования. Можно выделить

микротекстуры, которые сформировались как в магматическую, так и в более позднюю постмагматическую стадию развития рудообразующей системы. Присутствие включений Os-Ir-(Ru) сплава с преобладанием осмия в составе свидетельствует о высокотемпературных условиях и глубинном характере исходных расплавов. В зернах наблюдается результат магматической дифференциации тугоплавких фаз ЭПГ из Pt-Fe сплава, при этом составы Os-Ir-(Ru) сплавов отражают этап эволюции рудоформирующей системы. Они имеют выраженный осмиевый тренд от преимущественно осмиевого до иридиевого состава (см. рис. 5). Содержание Ir в самородном осмии возрастает на более поздних этапах формирования МПГ парагенезисов в процессе ее развития (Tolstykh et al., 2005). Об этом свидетельствует как состав Os-Ir-(Ru) сплавов, так и форма их выделения.

На основании оценки пространственно-временных взаимоотношений МПГ и изменения их химического состава можно предположить следующую последовательность формирования платинометаллической минерализации. Первым из магматического расплава кристаллизуется самородный

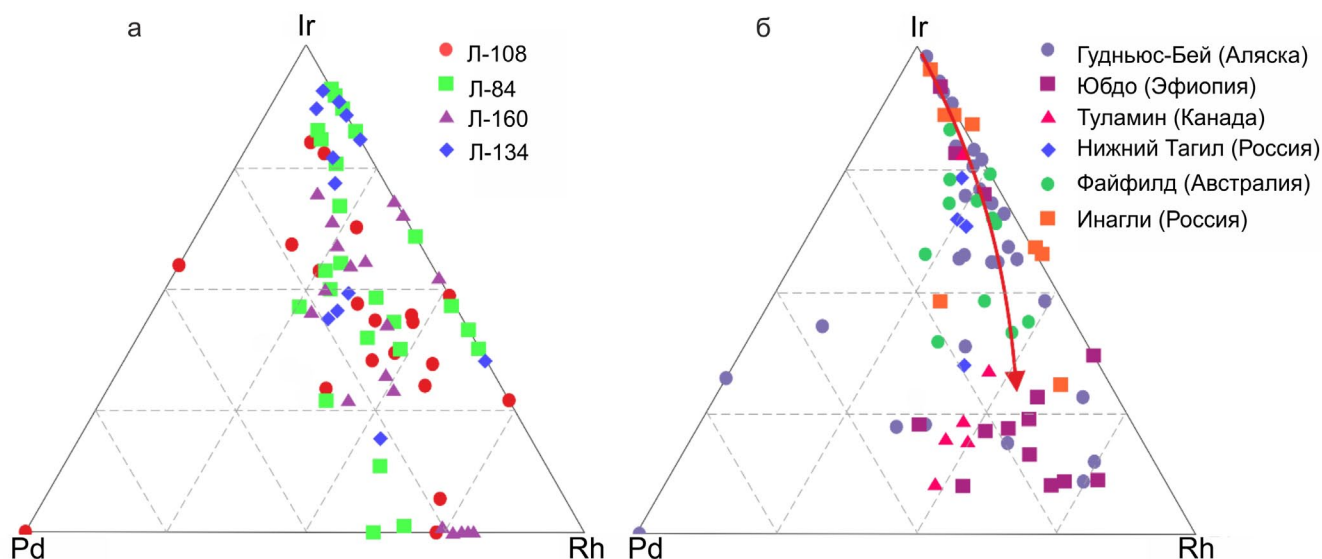


Рис. 9. Концентрация и соотношение примесных элементов в Pt-Fe сплавах аллювиальных россыпей р. Косьва и руч. Богатый Лог (а) и некоторых россыпей урало-алейского типа (б) (Tolstykh et al., 2002).

Fig. 9. Concentration and ratio of impurity elements in Pt-Fe alloys alluvial placers of the river Kosva and stream Bogaty Log (a) and some placers of the Ural-Alaskan type (b) (Tolstykh et al., 2002).

осмий – 1-я стадия (рис. 10), который формирует крупные идиоморфные кристаллы. По мере его кристаллизации окисно-металлическая составляющая расплава насыщается Ir. При этом часть расплава, обогащенная иридием Ir-Pt-Fe-(Os), при снижении температуры сепарируется вокруг уже существующих кристаллов осмия, возможно удерживаясь вокруг них за счет эффекта адгезии, – 2-я стадия (см. рис. 10). Индивиды (кристаллы) осмия при этом служат центрами кристаллизации для более поздних МПГ. В процессе остывания этого расплава, обогащенного иридием Ir-Pt-Fe-(Os), поэтапно выкристаллизовываются пластинчатые кристаллы осмия (см. рис. 10), а далее кристаллизуется и сам высокотемпературный твердый раствор – Ir-(Pt-Fe). При понижении температуры до 850–750°C (рис. 11) происходит распад твердого раствора Ir-(Pt-Fe) на Pt-Fe сплав, обогащенный иридием и самородный иридий, – 3-я стадия (см. рис. 7в). Магматический этап образования минералов платины завершается кристаллизацией Pt-Fe сплавов, часть из которых (более высокотемпературная) обогащена иридием. Высокая температура кристаллизации Pt-Fe сплава, согласно экспериментальным данным, способствует повышенному содержанию в нем Ir (Makovicky, Karup-Møller, 2000). Высокотемпературные Pt-Fe-(Ir) твердые растворы при понижении температуры распадаются на иридную изоферроплатину и обогащенный платиной иридий согласно экспериментальным диаграм-

мам двойных сплавов, это приводит к образованию эмульсионной вкрапленности Ir-(Os) сплавов в Pt-Fe матрице – 4-я стадия (см. рис. 10).

Исследование условий равновесия между сосуществующими сплавами Pt-Fe, Os-Ir и Ir-Os проиллюстрировано на рис. 11, который представляет собой проекцию двухфазных МПГ на псевдотернарную систему Pt+(Fe) – Os+(Ru) – Ir+(Rh) (Raub, 1964, Slansky et al., 1991; Vacher et al., 1954). Расчетные равновесные температуры для Pt-Fe, Os-Ir и Ir-Os сплавов находятся в диапазоне от 850 до 750°C.

Постмагматическое изменение первичных Pt-Fe сплавов представляло собой преобразование первичных минералов платины с преобладанием псевдоморфного замещения прежде всего за счет серпентинизации вмещающих пород, а также выветривания. Сначала происходило метасоматическое замещение Pt-Fe сплавов тетраферроплатиной (PtFe), а далее за счет привноса меди – туламинитом (Pt₂FeCu) (см. рис. 10, 5-я стадия), вплоть до формирования томамазита Cu₃Pt (см. рис. 8г, е). Тетраферроплатина и туламинит формируют каймы различного размера вокруг зерен Pt-Fe сплава с неровной, изогнутой линией контакта, что свидетельствует о процессах замещения, а не нарастания, либо развиваются вдоль трещин спайности по направлениям (111) и (100) и ослабленным зонам. Томамазит является редким минералом, встречающимся в ассоциациях МПГ из хромититов и пород зональных базит-ультрабазитовых комплек-

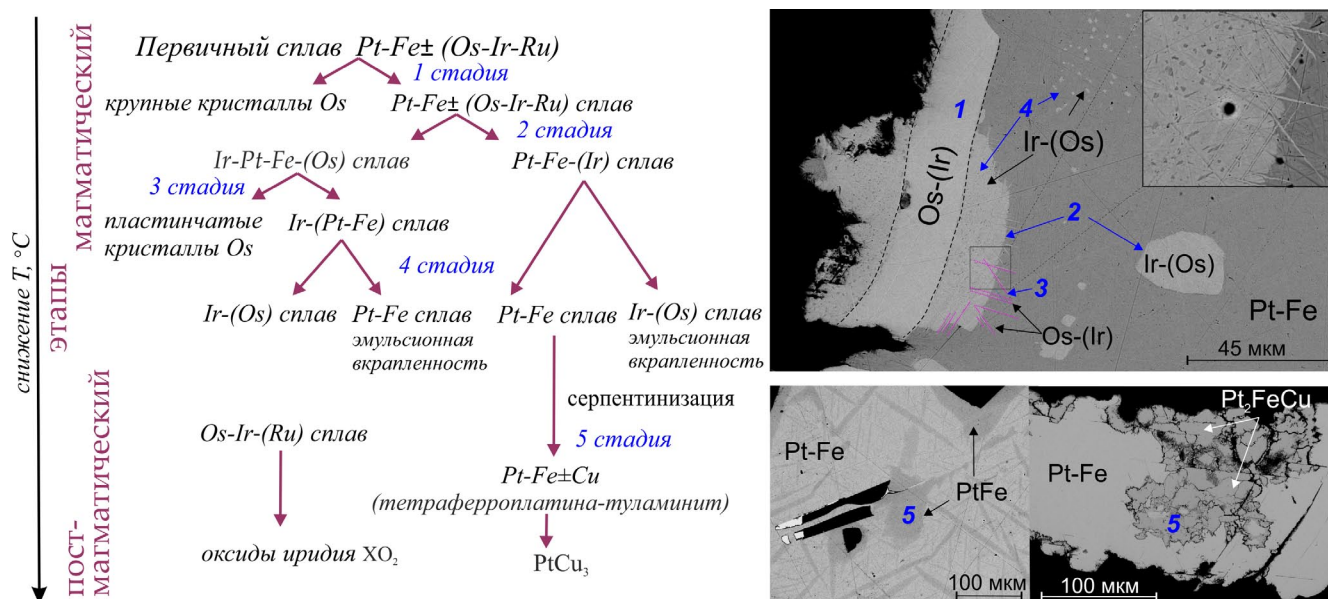


Рис. 10. Схема последовательности образования изученных МПГ из аллювиальных россыпей р. Косва и руч. Богатый Лог.

Справа на снимках СЭМ цифрами указаны минеральные фазы, отвечающие выделенным стадиям 1–5.

Fig. 10. Schematic representation formation of the studied MPGs from alluvial placers of the river Kosva and stream Bogaty Log.

In the SEM image (on the right), the numbers indicate the mineral phases corresponding to the selected stages 1–5.

сов урало-алаянского типа, а также в связанных с ними россыпях (Дистлер и др., 1986; Дмитренко и др., 1985; Tolstykh et al., 2002; Козлов и др., 2011; Шарыгин, Михайлов, 2022). Именно присутствие томамаэита является индикатором постмагматических преобразований первичной ЭПГ минерализации (Pt , Pt_3Fe , PtFe , $\text{Pt}_2\text{FeNi} \rightarrow \text{Pt}_2\text{FeCu} \rightarrow \text{PtCu}_3$), которые происходят в процессе серпентинизации (Tolstykh et al., 2015; Степанов и др., 2020; Kutuyev et al., 2021).

Включения Os-Ir-Ru сплавов являются химически устойчивыми фазами. Не случайно из большого количества исследованных микровкрапленников Os-Ir-Ru сплавов встречен лишь один с существенно преобразованным химическим составом. Он сложен зональным самородным осмием (изменение содержания Ir в сплаве), по трещинам которого развивается оксид Ir-Ru-Pt . Механизмом формирования оксидов ЭПГ, вероятно, стали процессы десульфуризации сульфидов ЭПГ, проходящих при гидротермальной проработке в период серпентинизации пород (Garuti et al., 1997; Ahmed, Arai, 2003). Само вмещающее зерно является специфичным для данной выборки. Оно представлено деформированным туламинитом, в красной части которого, кроме оксида ЭПГ, установлены единичные выделения высокопробной самородной плати-

ны (см. рис. 8д), что свидетельствует о гидротермально-метасоматическом преобразовании, возможно, в гипергенных условиях (Nesterenko et al., 2017). Присутствие в кайме туламинита выделений самородной высокопробной платины, скорее всего, свидетельствует о гипергенном преобразовании и селективном удалении железа из сплава Pt-Fe , аналогичных описанным для зерен хонгшиита месторождений Итабиры, Минас-Жерайс (Бразилия) (Kwitko et al., 2002; Cabral et al., 2008; Bowles et al., 2018). Такое сильно измененное в гипергенных условиях зерно МПГ надо рассматривать как аномальное среди остальных изученных зерен. Общей чертой онтогенетических особенностей всех зерен МПГ служат черты метасоматического преобразования зерен в процессе серпентинизации пород при незначительном свидетельстве их гипергенного преобразования или отсутствии следов такового. Это представляется естественным следствием их гипергенной устойчивости – давно установленной особенностью МПГ (Кухаренко, 1961), связанных с массивами урало-алаянского типа и офиолитовыми гипербазитами. Вместе с тем в ситуациях интенсивного проявления процессов образования кор химического выветривания и их перемива эта закономерность отступает. Примером может служить Кельбеский золотоносный район, распо-

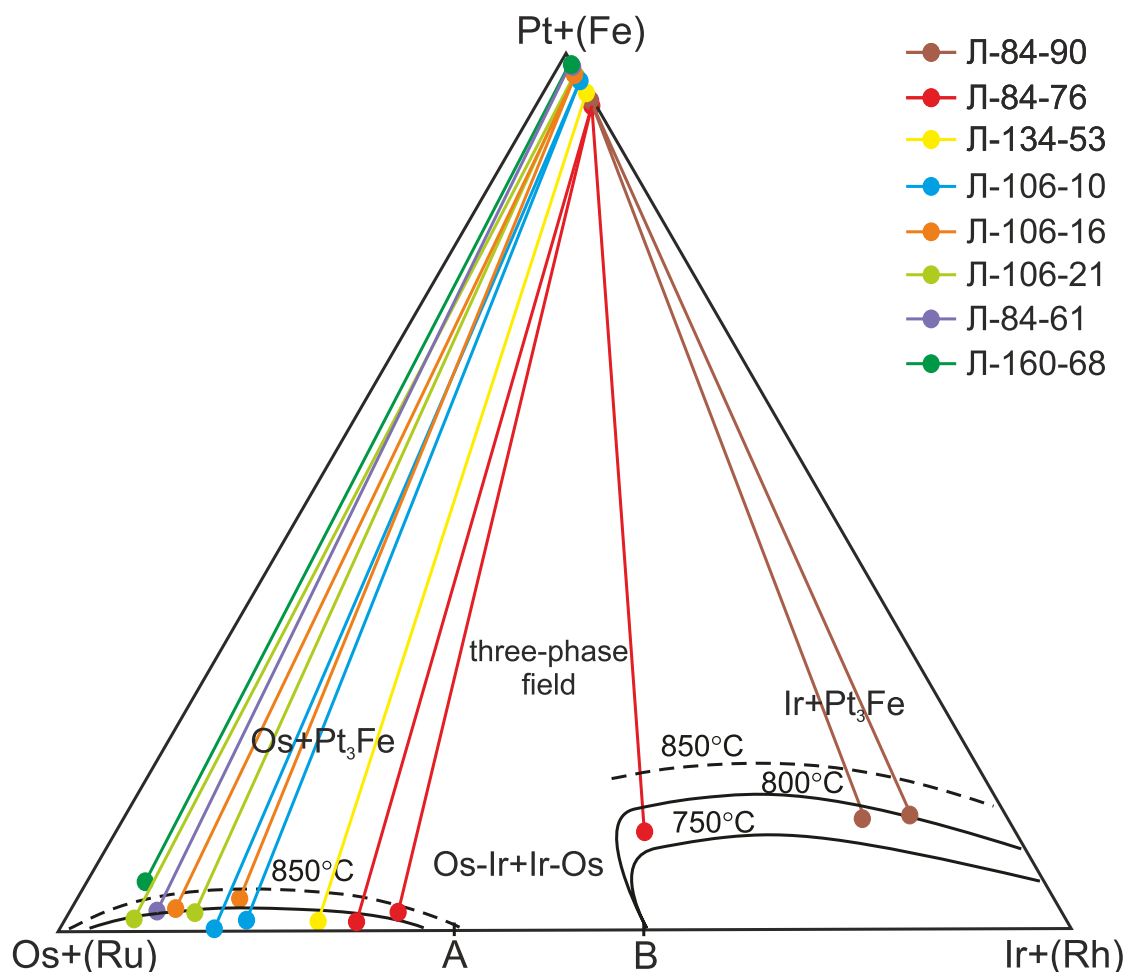


Рис. 11. Псевдотерная фазовая диаграмма системы Pt+(Fe)–Os+(Ru)–Ir+(Rh), иллюстрирующая оценки температуры сплавов Os–Ir и Ir–Os, выделенных из сплавов Pt–Fe.

Точки А и В указывают пределы смешиваемости по данным экспериментов (Raub, 1964; Vacher et al., 1954). Изотермы оцениваются по бинарному сольвусу в системе Pt–Ir (Raub, Plate, 1956). Сосуществующие фазы Os–Ir сплавов и состав зерна обозначены одним цветом.

Fig. 11. Pseudoternary phase diagram of the Pt+(Fe)–Os+(Ru)–Ir+(Rh) system, illustrating temperature estimates for Os–Ir and Ir–Os alloys isolated from Pt–Fe alloys.

Points A and B indicate miscibility limits based on experimental data (Vacher et al., 1954; Raub, 1964). Isotherms are estimated from the binary solvus in the Pt–Ir system (Raub, Plate, 1956). Coexisting phases of Os–Ir alloys and grain composition are displayed in the same color.

ложенный на северо-западном сглаженном погружении Кузнецкого Алатау (Гусев и др., 2020). Там широко распространены подобные коры выветривания и продукты их речного перемыва. Некоторые зерна изоферроплатины из аллювия Кельбесского района несут четкие каймы выщелачивания Fe и Ni.

Определенный интерес представляют зерна твердых растворов Pt-Fe-(Cu) с “рваными”, выщербленными краями (см. рис. 6г-е). Механическая деформация таких зерен, скорее всего, осуществлялась в ходе речного переноса обломочного материала. Обусловлена она слабой прочностью краевых

зон, представленных каймами туламинита, что связано с их интенсивной трещиноватостью. Она значительно выше, чем трещиноватость неизменных зерен Pt-Fe и однофазных зерен МПГ. Большая часть последних либо не содержит трещин, либо содержит единичные. Встречено лишь одно существенно дробленое зерно (см. рис. 4и). Следовательно, роль промежуточных коллекторов в формировании платиноносной россыпи р. Косьва минимальна. Она результат размыва коренных источников и относится к россыпям ближнего сноса. Упомянутые зерна МПГ с “рваными”, выщерблен-

ными краями можно отнести к конечной стадии преобразования кайм туламинита. Уцелевшие каймы резко отделены от матриц угловато-извилистыми трещинами. Сами каймы разбиты двумя разновидностями микротрещин. Одна из них, представленная поперечными трещинами разрыва, является результатом дробления и может быть отнесена к катакластической группе (Исаенко, 1973). Другая – выражена сетью мелких извилистых разнонаправленных микротрещин. Густота сети растет к краю зерна. Механизм и причины их образования остается пока не понятным. По-видимому, они не связаны с однонаправленным дроблением. Возможно, по генезису они близки усталостным микротрещинам сетчатой микроструктуры металла (Терентьев, 2003).

Благодарности

Эта статья последняя работа Глеба Васильевича Нестеренко (21.01.1927–06.07.2023) открывшего природный сульфид золота (петровскайт), вдохновлявшего коллег своим жизнелюбием и неиссякаемым интересом к геологии. Авторы выражают благодарность редакторам и рецензентам за проделанную работу, ценные замечания и предложения. Работа выполнена в Центре коллективного пользования многоэлементными и изотопными исследованиями Сибирского отделения Российской академии наук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Зерна МПГ из платиноносных россыпей р. Косьва, главной водной артерии Кытлымского платиноносного узла, и руч. Богатый Лог практически полностью наследуют состав платиновой минерализации питающих коренных источников – ультрамафитовых комплексов западного склона Кытлымского КЗУМа, прежде всего хромитов из эродированных серпентинизированных дунитов.

2. Влияние промежуточных до четвертичных коллекторов (ископаемых россыпей) на формирование платиноносных россыпей р. Косьвы и руч. Богатый Лог минимально. Это автохтонные долинные аллювиальные россыпи, возникшие в результате непосредственного размыва коренных источников.

3. Платиновая минерализация россыпей р. Косьва и руч. Богатый Лог представлена $Pt-Fe\pm(Cu)$ сплавами, содержащими включения $Os-Ir-(Ru)$ интерметаллидов, редко лаурита, ирарсита. Для большинства зерен характерно постмагматическое преобразование ЭПГ ($Pt, Pt_3Fe, PtFe, Pt_2FeCu \rightarrow PtCu_3$), проявляющееся в псевдоморфном замещении и формировании кайм замещения разной степени интенсивности тетраферроплатина–туламинитового состава.

4. Среди вторичных минералов платиновой группы установлен ранее не описанный в литера-

туре интерметаллид родия, меди, палладия и олова – неназванный МПГ (Rh, Pd, Cu, Pt)₃Sn, образующий включения в туламините.

5. Существенной предпосылкой образования рваных выщербленных краев зерен МПГ послужило наличие двух систем трещин в каймах туламинита и, соответственно, механическая слабость кайм. Одна из систем трещин – следствие дробления. Генезис другой мелкосетчатой системы трещин не ясен. Возможно, он сопоставляется с усталостными трещинами металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранников А.Г. (2015) Геотектонические и палеогеморфологические факторы золотого рудогенеза мезозоя Урала. *Россыпи и месторождения кор выветривания: изучение, освоение, экология*. Мат-лы XV Междунар. совещ. по геологии россыпей и месторождений кор выветривания. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 16–18.
- Баранников А.Г., Осовецкий Б.М. (2014) Платиновые и платиносодержащие россыпи Урала, критерии и признаки их пространственной связи с первоисточниками. *Изв. Урал. гос. горн. ун-та*, 3(35), 1–29.
- Бетехтин А.Г. (1935) Платина и другие металлы платиновой группы. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 148 с.
- Волченко Ю.А., Золосев К.К., Коротеев В.А., Малахов И.А., Мардиросьян А.Н. (1994) Платина Урала, Платинометалльное оруденение и перспективы его освоения. *Изв. вузов. Горн. журн.*, 2(6), 62–85.
- Волченко Ю.А., Золосев К.К., Коротеев В.А., Мардиросьян А.Н., Неустроева И.И. (1998) Новые и перспективные типы платинометалльного оруденения Урала. *Геология и металлогения Урала*. Кн. 1. Екатеринбург, 238–255.
- Волченко Ю.А., Иванов К.С., Коротеев В.А., Оже Т. (2007) Структурно-вещественная эволюция комплексов платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Ч. I. *Литосфера*, (3), 3–27.
- Высоцкий Н.К. (1923). О коренных месторождениях платины на Урале и в Сибири. *Изв. Геол. комитета* (42), 15–21.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2005) М-6 1 : 200 000 (третье поколение). Урал. сер. Лист О-40-VI.
- Готтман И.А., Пушкарев Е.В. (2009) Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габбро-ультрамафитовых комплексах урало-алаянского типа. *Литосфера*, (2), 78–86.
- Гусев В.А., Нестеренко Г.В., Жмодик С.М., Белянин Д.К. (2020) Два типа ассоциаций минералов платиновой группы в золотоносных россыпях северо-западной части Кузнецкого Алатау. *Геосферн. исследования*, (1), 19–32.
- Дистлер В.В., Крячко В.В., Лапутина И.П. (1986) Эволюция парагенезисов платиновых металлов в альпинотипных гипербазитах. *Геол. руд. месторождений*, (5), 16–33.
- Дмитренко Г.Г., Мочалов А.Г., Паланджян С.А., Горячева Е.М. (1985) Химические составы пороодообра-

- зующих и аксессуарных минералов альпинотипных ультрамафитов Корякского нагорья. Ч. 2. *Минералы платиновых элементов*. Магадан, СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 60 с.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П. (1967) Кытлымский платиноносный массив. М.: Недра, 340 с.
- Заварицкий А.Н. (1928). Коренные месторождения платины на Урале. *Материалы по общей и прикладной геологии*. М.: Изд-е Геол. комитета, 108, 56 с.
- Зайцев А.М. (1889). Месторождения платины на Урале. Томск: Типолитография М.Н. Кононова и И.Ф. Скулимовского, 75 с.
- Иванов О.К. (1997). Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала (минералогия, петрология, генезис). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 488 с.
- Исаенко М.И. (1973). Определитель текстур и структур руд. М.: Недра, 229 с.
- Кашин С.А., Козак С.С., Николаева Л.А., Тихомиров К.П. (1956) Минералогические и петрохимические особенности пород платиноносной формации Среднего Урала и некоторые закономерности распределения коренной платины. М.: НИГРИ Золото МЦМ СССР, 113 с.
- Козлов А.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Манибаев А.М. (2019) Онтогенетические ориентиры для выбора модели формирования платинового оруденения в зональных клинопироксенит-дунитовых массивах Урала. *Зап. минерал. общ-ва, CXLVIII*(2), 115-130. <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1482.08>
- Козлов А.П., Чантурия В.А., Сидоров Е.Г., Толстых Н.Д., Телегин Ю.М. (2011) Крупнообъемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-алаянского типа и перспективы их освоения. *Геол. руд. месторождений*, **53**(5), 419–437.
- Кузьмин И.А., Калугин В.М. (2021) Морфологические признаки таймырита в эвтектических галенит-халькопиритовых рудах Октябрьского медно-никелевого месторождения, Норильский район, Россия. *Новое в познании процессов рудообразования*. Мат-лы X Росс. молодежн. науч.-практ. школы. М.: ИГЕМ РАН, 164-167.
- Кузьмин И.А., Паламарчук Р.С., Калугин В.М., Козлов А.В., Варламов Д.А. (2020) Хромит-платиновая минерализация клинопироксенит-дунитового массива Желтая Сопка, Северный Урал. *Минералогия*, **6**(4), 46-59. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-4-3>
- Кухаренко А.А. (1961) Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, 318 с.
- Лихачев А.П., Кириченко В.Т., Лопатин Г.Г., Кириченко А.А., Дерягина Г.Г., Рудашевский Н.С., Ботова М.М. (1987) К особенностям платиноносности массивов щелочно-ультраосновной формации. *Зап. ВМО*, **116** (1), 122-125.
- Малахов И.А., Малахова Л.В. (1970) Нижне-Тагильский пироксенит-дунитовый массив и вмещающие его породы. Свердловск: УФ АН СССР, 166 с.
- Малич К.Н., Ефимов А.А., Баданина И.Ю. (2011) Контрастные минеральные ассоциации платиноидов из хромититов Нижнетагильского и Гулинского массивов (Россия): состав, источники вещества, возраст. *Докл. АН*, **441**(1), 83-87.
- Михайлов В.В., Степанов С.Ю., Козлов А.В., Петров С.В., Паламарчук Р.С., Шиловских В.В., Абрамова В.Д., Корнеев А.В. (2021) Новое медно-благороднометалльное рудопоявление в габбро массива Серебрянского камня, Платиноносный пояс Урала (Северный Урал). *Геол. руд. месторождений*, **63**(6), 520-550.
- Паламарчук Р.С. (2023) Условия формирования россыпеобразующих систем, связанных с клинопироксенит-дунитовыми массивами Среднего Урала. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГУб, 110 с.
- Паламарчук Р.С., Степанов С.Ю., Ханин Д.А., Антонов А.В., Золотарев А.А. (2017) Сравнительная характеристика минералов платиновой группы из элювиально-делювиальной россыпи из хромититов Светлоборского клинопироксенит-дунитового массива (Средний Урал). *Минералогия*, **3**(4), 37-50.
- Петров Г.А., Маслов А.В. (2010) Новые данные о платиноносности верхнерифейско-вендских отложений Центрально-Уральской мегазоны (Средний и Северный Урал). *Изв. вузов. Геология и разведка*, (3), 25-33.
- Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов юга Сибири. (1995) (Под ред. Г.В. Полякова, В.И. Богникова). Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 151 с.
- Пушкарев Е.В. (2000) Петрология Уктусского дунит-клинопироксенит-габбрового массива (Средний Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 296 с.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф. (2007) Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблемы генезиса. *Литосфера*, (3), 28-65.
- Пушкарев Е.В., Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Морозова А.В., Миронов А.Б. (2016) Зональность и платиноносность хромититов Нижнетагильского и Кытлымского массива Платиноносного пояса Урала по данным окситермобарометрии. *Ежегодник-2016. Тр. ИГТ УрО РАН*, вып. 163, 164-167.
- Разин Л.В. (2008) Промышленно-перспективный минерально-сырьевой потенциал Уральского Платиноносного пояса. М.: Университет. книга, 171 с.
- Рамдор П. (1962) Рудные минералы и их сростания. М.: Мир, 1132 с.
- Сидоров Е.Г., Козлов А.П., Толстых Н.Д. (2012) Гальмозанский базит-гипербазитовый массив и его платиноносность. М.: Науч. мир, 288 с.
- Степанов С.Ю. (2015) Сравнительная характеристика платиновой минерализации Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского дунит-клинопироксенитовых интрузивов (Средний Урал, Россия). *Новые данные о минералах*, **50**, 29-37.
- Степанов С.Ю. (2018) Структурно-вещественные закономерности проявления хромит-платинового оруденения в клинопироксенит-дунитовых массивах Среднего Урала. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГУб, 174 с.
- Степанов С.Ю., Малич К.Н., Козлов А.В., Баданина И.Ю., Антонов А.В. (2017). Платиноидная минерализация Светлоборского и Вересовоборского клинопироксенит – дунитовых массивов Среднего Урала (Россия). *Геол. руд. месторождений*, **59**(3), 238-250. <https://doi.org/10.7868/S0016777017030066>
- Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Варламов Д.А., Козлов А.В., Ханин Д.А., Антонов А.В. (2020) Минералы

- платиновой группы из делювиальной россыпи реки Вересовка, Вересовоборский клинопироксенит-дунитовый массив (Средний Урал). *ЗРМО*, **147**(5), 40-60. <https://doi.org/10.30695/zrmo/2018.1475.03>
- Степанов С.Ю., Пучков В.Н., Паламарчук Р.С., Варламов Д.А., Шиловских В.В., Козлов А.В. (2021) Первые находки самородного иридия в коренных хромит-платиновых рудах и россыпях зональных клинопироксенит-дунитовых массивов Урала. *Докл. РАН*, **499**(2), 118-124.
- Терентьев В.Ф. (2003) Усталость металлических материалов. М.: Наука, 254 с.
- Толстых Н.Д., Козлов А.П., Телегин Ю.М. (2011) Коренная платиновая минерализация Светлоборского и Нижнетагильского массивов, Платиноносный пояс Урала. *Платина России*. Т. VII, Красноярск, 297-312.
- Толстых Н.Д., Кривенко А.П., Батулин С.Г. (1996) Особенности состава самородной платины из различных ассоциаций минералов элементов платиновой группы. *Геология и геофизика*, **37**(3), 39-46.
- Хабаров А.В. (1946) Об индексах окатанности галечников. *Сов. геология*, **10**, 98-99.
- Шарыгин В.В., Михайлов И.Г. (2022) Томамаэит Cu_3Pt в самородном осмии из речных отложений в Нижнесергинском районе, Средний Урал. *Минералогия*, **8**(2), 5-14. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-2-1>
- Якубович О.В., Мочалов А.Г., Паламарчук Р.С., Васильева Н.А., Мостовая М.Э., Стюарт Ф. (2021) Длительность образования уникальных россыпных месторождений платиновых металлов (р. Кондер, Хабаровский край и р. Ис, Средний Урал) по результатам космогенного ^3He датирования. *Россыпи и месторождения кор выветривания XXI в.: задачи, проблемы, решения*. Мат-лы XVI Междунар. совещ. по геологии россыпей и месторождений кор выветривания: Воронеж: Цифровая полиграфия, 104-105.
- Ahmed H. Ahmed, Arai S. (2003) Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.*, **41**, 597-616. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.41.3.597>
- Amosse J., Dable P., Allibert M. (2000) Thermochemical behaviour of Pt, Ir, Rh, and Ru vs $f\text{O}_2$ and $f\text{S}_2$ in a basaltic melt. Implications for the differentiation and precipitation of these elements. *Miner. Petrol.*, **68**, 29-62.
- Barkov A.Y., Martin R.F., Poirier G., Yakovlev Y.N. (2000) The taimyrite-tatyanaitite series and zoning in intermetallic compounds of Pt, Pd, Cu, and Sn from Noril'sk, Siberia, Russia. *Canad. Miner.*, **38**, 599-609.
- Bowles J.F.W., Gize A.P., Vaughan D.J. Norris S.J. (1995) Organic controls on platinum-group element (PGE) solubility in soils: initial data. *Chronique de la Recherche Minière*, **520**, 65-73.
- Bowles J.F.W., Suarez S., Prichard H.M., Fisher P.C. (2018) The mineralogy, geochemistry and genesis of the alluvial platinum-group minerals of the Freetown Layered Complex, Sierra Leone. *Miner. Mag.*, **82**(S1), S223-S246. <http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2017.081.032>
- Cabri L.J., Feather C.E. (1975) Platinum-iron alloys: a nomenclature based on a study of natural and synthetic alloys. *Canad. Miner.*, **13**, 117-126.
- Cabral A.R., Galbiatti H.F., Kwitko-Ribeiro R., Lehmann B. (2008) Platinum enrichment at low temperatures and related microstructures, with examples of hongshiite (PtCu) and empirical ' Pt_2HgSe_3 ' from Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Terra Nova*, **20**, 32-37. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00783.x>
- Fedortchuk Y., Le Barge W., Barkov A.Y., Fedele L., Bondar R.J., Martin R.F. (2010) Platinum-group minerals from a placer deposits in Burwash Creek, Kluane area, Yukon Territory, Canada. *Canad. Miner.*, **48**, 583-596.
- Garuti G., Cabella R., German F. (1997) Occurrence of unknown Ru-Os-Ir-Fe oxide in the chromitites of the Nurali ultramafic complex. *Canad. Miner.*, **35**, 1431-1440.
- Garuti G., Pushkarev E., Zaccarini F. (2002) Composition and paragenesis of Pt alloys from chromitites of the Uralian-Alaskan type Kytlym and Uktus complexes, Northern and Central Urals, Russia. *Canad. Miner.*, **40**, 357-376. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.40.4.1127>
- Gornostayev S., Crocket, J., Mochalov, A.G., Laajoki, K.V.O. (1999) The platinum-group minerals of the Baimka placer Deposits, Aluchin Horst, Russian Far East. *Canad. Miner.*, **37**, 1117-1129.
- Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Miner.*, **29**(2), 231-237.
- Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Kamenetsky V.S., Chubarov V.M., Chayka I.F., Abersteiner A. (2021) Platinum mineralization and geochemistry of the Matsysken zoned Ural-Alaskan type complex and related placer (Far East Russia). *Ore Geol. Rev.*, **130**(334), 103947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103947>
- Kwitko R., Cabral A.R., Lehmann B., Laflamme J.H.G., Cabri L.J., Criddle A.J., Galbiatti H.F. (2002) Hongshiite, PtCu , from Itabirite-hosted Au-Pd-Pt mineralization (Jacutinga), Itabira District, Minas Gerais, Brazil. *Canad. Miner.*, **40**, 711-723. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.40.2.711>
- Makovicky E., Karup-Møller S. (2000) Phase relations in the metal-rich portions of the phase system Pt-Ir-Fe-S at 1000°C and 1100°C. *Miner. Mag.*, **64**(6), 1047-1056. <http://dx.doi.org/10.1180/002646100550047>
- Malitch K.N., Thalhammer O.A.R. (2002) Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: A structural, compositional and osmium-isotope study. *Canad. Miner.*, **40**, 395-418. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.2.395>
- Nesterenko G.V., Zhmodik S.M., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Bogush A.A. (2017) Colloform high-purity platinum from the placer deposit of Koura River (Gornaya Shoriya, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **91**, 236-245.
- Nishio-Hamane D., Saito K. (2020) Tomamaeite, IMA 2019-129. CNMNC Newslett. No. 55. *Miner. Mag.*, **84**. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.39>
- Raub E. (1964) Die Ruthenium-Iridium-Legierungen. *Z. Metallkunde*, **55**(6), 316-319.
- Raub E., Plate W. (1956) Tempering and decomposition of platinum-iridium alloys. *Z. Metallkunde*, **47**, 688-693.
- Slansky E., Johan Z., Ohnenstetter M., Barron L.M., Suppel D. (1991) Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, NSW, Australia. 2. Platinum-group minerals in placer deposits at Fifield. *Mineral. Petrol.*, **43**, 161-180.
- Stepanov S., Palamarchuk R., Kozlov A., Khanin D., Varlamov D., Kiseleva D. (2019) Platinum-Group Minerals of Pt-Placer Deposits Associated with the Svetloborsky

- Ural-Alaskan Type Massif, Middle Urals, Russia. *Minerals*, **9**(77), 1-25. <https://doi.org/10.3390/min9020077>
- Tolstykh N., Foley J.Y., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., (2002) Composition of the platinum-group minerals in the Salmon River plaser deposit, Goolnews Bay, Alaska. *Canad. Miner.*, **40**, 463-471. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.2.463>
- Tolstykh N.D., Kozlov A., Telegin Yu., (2015). Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt. *Ore Geol. Rev.*, **67**, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.005>
- Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Krivenko A.P. (2005) Platinum-group element placers associated with Ural-Alaska type complexes. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*. (Ed. J.E. Mungall). V. 35. The Mineralogical Association of Canada: Quebec City, QC, Canada, 113-143
- Vacher H.C., Bechtoldt C., Maxwell E. (1954) Structure of some iridium–osmium alloys. *Metals Trans. AIME*, **200**, 80.
- Zaccarini F., Garuti G., Pushkarev E.V. (2011) Unusually PGE-rich chromitite in the Butyrin vein of the Kytlym Uralian-Alaskan complex, Northern Urals, Russia. *Canad. Miner.*, **49**, 1413-1431. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.6.1413>
- Zaccarini F., Garuti G., Pushkarev E., Thalhammer O. (2018) Origin of Platinum Group Minerals (PGM) Inclusions in Chromite Deposits of the Urals. *Minerals*, **8**(9), 379. <https://doi.org/10.3390/min8090379>
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Y.D. (2017) Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 299-320. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.001>
- Zhmodik S.M., Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Podlipsky M.Yu., Karmanov N.S. (2016) Alluvial platinum-group minerals as indicators of primary PGE mineralization (placers of southern Siberia). *Russ. Geol. Geophys.*, **57**(10), 1437-1464. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20161005>
- tallic compounds of Pt, Pd, Cu, and Sn from Noril'sk, Siberia, Russia. *Canad. Miner.*, **38**, 599-609.
- Betekhtin A.G. (1935) Platinum and other platinum group metals. Moscow; Leningrad, Izd-vo Akad. Nauk SSSR, 148 p. (In Russ.)
- Bowles J.F.W., Gize A.P., Vaughan D.J. Norris S.J. (1995) Organic controls on platinum-group element (PGE) solubility in soils: initial data. *Chronique de la Recherche Minière*, **520**, 65-73.
- Bowles J.F.W., Suarez S., Prichard H.M., Fisher P.C. (2018) The mineralogy, geochemistry and genesis of the alluvial platinum-group minerals of the Freetown Layered Complex, Sierra Leone. *Mineral. Mag.*, **82**(S1), S223-S246.
- Cabral A.R., Galbiatti H.F., Kwitko-Ribeiro R., Lehmann B. (2008) Platinum enrichment at low temperatures and related microstructures, with examples of hongshiite (PtCu) and empirical 'Pt₂HgSe₃' from Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Terra Nova*, **20**, 32-37.
- Cabri L.J., Feather C.E. (1975) Platinum-iron alloys: a nomenclature based on a study of natural and synthetic alloys. *Canad. Miner.*, **13**, 117-126.
- Distler V.V., Kryachko V.V., Laputina I.P. (1986) Evolution of platinum metal parageneses in Alpine-type ultramafics. *Geol. Ore Depos.*, (5), 16-33 (translated from *Geol. Rud. Mestorozh.*, **41**(2), 143-153).
- Dmitrenko G.G., Mochalov A.G., Palanjyan S.A., Goryacheva E.M. (1985) Chemical compositions of rock-forming and accessory minerals of alpinotype ultramafic rocks of the Koryak Highlands. Pt 2. *Minerals of platinum elements*. Magadan, SVKNII DVNTs AN SSSR, 60 p. (In Russ.)
- Efimov A.A., Efimova L.P. (1967) Kytlym platinum-bearing massif. Moscow, Nedra Publ., 340 p. (In Russ.)
- Fedorchuk Y., Le Barge W., Barkov A.Y., Fedele L., Bondar R.J., Martin R.F. (2010) Platinum-group minerals from a placer deposits in Burwash Creek, Kluane area, Yukon Territory, Canada. *Canad. Miner.*, **48**, 583-596.
- Garuti G., Cabella R., German F. (1997) Occurrence of unknown Ru-Os-Ir-Fe oxide in the chromitites of the Norali ultramafic complex. *Canad. Miner.*, **35**, 1431-1440.
- Garuti G., Pushkarev E., Zaccarini F. (2002) Composition and paragenesis of Pt alloys from chromitites of the Uralian-Alaskan type Kytlym and Uktus complexes, Northern and Central Urals, Russia. *Canad. Miner.*, **40**, 357-376.
- Gornostayev S., Crockett, J., Mochalov, A.G., Laajoki, K.V.O. (1999) The platinum-group minerals of the Baimka placer Deposits, Aluchin Horst, Russian Far East. *Canad. Miner.*, **37**, 1117-1129.
- Gottman I.A., Pushkarev E.V. (2009) Geological data on the magmatic nature of hornblendites in gabbro-ultramafic complexes of the Ural-Alaskan type. *Lithosphere*, (2), 78-86. (In Russ.)
- Gusev V.A., Nesterenko G.V., Zhmodik S.M., Belyanin D.K. (2020) Two types of associations of platinum group minerals in gold placers in the northwestern part of the Kuznetsk Alatau. *Geosfernye Issledovaniya*, (1), 19-32. (In Russ.)
- Harris D.C., Cabri L.J. (1991) Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Miner.*, **29**(2), 231-237.
- Isaenko M.I. (1973). Determinant of textures and structures of ores. Moscow, Nedra Publ., 229 p. (In Russ.)
- Ivanov O.K. (1997). Concentrically zoned pyroxenite-dun-

REFERENCES

- Ahmed H., Arai S. (2003) Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.*, **41**, 597-616.
- Amosse J., Dable P., Allibert M. (200) Thermochemical behaviour of Pt, Ir, Rh, and Ru vs fO_2 and fS_2 in a basaltic melt. Implications for the differentiation and precipitation of these elements. *Miner. Petrol.*, **68**, 29-62.
- Barannikov A.G. (2015) Geotectonic and paleogeomorphological factors of gold ore genesis in the Mesozoic Urals. *Placers and deposits of weathering crusts: study, development, ecology*. Materials of the XV international meeting on the geology of placers and deposits of weathering crusts. Perm, Perm State National Research University, 16-18. (In Russ.)
- Barannikov A.G., Osovetsky B.M. (2014) Platinum and platinum-bearing placers of the Urals, criteria and signs of their spatial connection with primary sources. *Izv. Ural. Gos. Gornogo Universiteta*, **3**(35), 1-29. (In Russ.)
- Barkov A.Y., Martin R.F., Poirier G., Yakovlev Y.N. (2000) The taimyrite-tatyanite series and zoning in interme-

- ite massifs of the Urals: Mineralogy, petrology, genesis. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 488 p. (In Russ.)
- Kashin S.A., Kozak S.S., Nikolaeva L.A., Tikhomirov K.P. (1956) Mineralogical and petrochemical features of rocks of the platinum-bearing formation of the Middle Urals and some patterns of distribution of primary platinum. Moscow, NIGRI Gold MCM USSR, 113 p. (In Russ.)
- Khabakov A.V. (1946) On the indices of the rolling of pebbles. *Sov. Geologiya*, **10**, 98-99. (In Russ.)
- Kozlov A.P., Chanturia V.A., Sidorov E.G., Tolstykh N.D., Telegin Yu.M. (2011) Large-volume platinum ore deposits in zonal mafic-ultrabasic complexes of the Ural-Alaskan type and prospects for their development. *Geo. Ore Depos.*, **53**(5), 374-389 (translated from *Geol. Rud. Mestorozh.*, **53**(5), 419-437).
- Kozlov A.V., Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Manibaev A.M. (2019) Ontogenic guidelines for choosing a model for the formation of platinum mineralization in zonal clinopyroxenite-dunite massifs of the Urals. *Zapiski Mineralog. Obshchestva*, Pt CXLVIII, (2), 115-130. (In Russ.)
- Kukharensko A.A. (1961) Mineralogy of placers. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 318 p. (In Russ.)
- Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Kamenetsky V.S., Chubarov V.M., Chayka I.F., Abersteiner A. (2021) Platinum mineralization and geochemistry of the Matysken zoned Ural-Alaskan type complex and related placer (Far East Russia). *Ore Geol. Rev.*, **130**(334), 103947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103947>
- Kuz'min I.A., Palamarchuk R.S., Kalugin V.M., Kozlov A.V., Varlamov D.A. (2020) Chromite-platinum mineralization of the clinopyroxenite-dunite massif Zheltaya Sopka, North Urals. *Mineralogiya*, **6**(4), 46-59. (In Russ.)
- Kuz'min I.A., Kalugin V.M. (2021) Morphological differences of taumyrite in eutectic galena-chalcopyrite ores of the Oktyabrsky copper-nickel deposit, Norilsk district, Russia. Materials of the X Russian Youth Scientific and Practical School "New in the knowledge of ore formation processes". Moscow, IGEM RAN Publ., 164-167.
- Kwitko R., Cabral A.R., Lehmann B., Laflamme J.H.G., Cabri L.J., Criddle A.J., Galbiatti H.F. (2002) Hongshite, PtCu, from Itabirite-hosted Au-Pd-Pt mineralization (Jacutinga), Itabira District, Minas Gerais, Brazil. *Canad. Miner.*, **40**, 711-723.
- Likhachev A.P., Kirichenko V.T., Lopatin G.G., Kirichenko A.A., Deryagina G.G., Rudashevskii N.S., Botova M.M. (1987) To the features of platinum potential of the massifs of the alkaline-ultramafic formation. *Zapiski VMO*, **116**(1), 122-125. (In Russ.)
- Makovicky E., Karup-Møller S. (2000) Phase relations in the metal-rich portions of the phase system Pt-Fe-S at 1000°C and 1100°C. *Miner. Mag.*, **64**(6)6, 1047-1056.
- Malakhov I.A., Malakhova L.V. (1970) The Nizhny Tagil pyroxenite-dunite massif and its host rocks. Sverdlovsk, UFAN SSSR Publ., 166 p.
- Malich K.N., Efimov A.A., Badanina I.Yu. (2011) Contrasting mineral associations of platinum group metals from chromitites of the Nizhny Tagil and Gulinsky massifs (Russia): composition, sources of matter, age. *Dokl. Akad. Nauk*, **441**(1), 83-87. (In Russ.)
- Malitch K.N., Thalhammer O.A.R. (2002) Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: A structural, compositional and osmium-isotope study. *Canad. Miner.*, **40**, 395-418.
- Mikhailov V.V., Stepanov S.Yu., Kozlov A.V., Petrov S.V., Palamarchuk R.S., Shilovkikh V.V., Abramova V.D., Korneev A.V. (2021) A new copper-precious metal ore occurrence in the gabbro of the Serebryansky stone massif, the Platinum-bearing belt of the Urals (Northern Urals). *Geol. Rud. Mestorozhdenii*, **63**(6), 520-550. (In Russ.)
- Nesterenko G.V., Zhmodik S.M., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Bogush A.A. (2017) Colloform high-purity platinum from the placer deposit of Koura River (Gornaya Shoriya, Russia). *Ore Geol. Rev.*, **91**, 236-245.
- Nishio-Hamane D., Saito K. (2020) Tomamaeite, IMA 2019-129. CNMNC Newsletter No. 55. *Miner. Mag.*, **84**. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.39>
- Palamarchuk R.S. (2023) Conditions for the formation of placer-forming systems associated with clinopyroxenite-dunite massifs of the Middle Urals. Cand. geol. and min. sci. diss. Sci. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 110 p. (In Russ.)
- Palamarchuk R.S., Stepanov S.Yu., Khanin D.A., Antonov A.V., Zolotarev A.A. (2017) Comparative characteristics of platinum group minerals from the eluvial-deluvial placer of chromitites of the Svetlobor clinopyroxenite-dunite massif (Middle Urals). *Mineralogiya*, **3**(4), 37-50. (In Russ.)
- Petrov G.A., Maslov A.V. (2010) New data on the platinum content of the Upper Riphean-Vendian deposits of the Central Ural megazone (Middle and Northern Urals). *Izvestiyavuzov. Geologiya i Razvedka*, (3), 25-33. (In Russ.)
- Platinum-bearing ultrabasic-basite complexes of Southern Siberia. (1995) (Eds G.V. Polyakov, V.I. Bognibov). Novosibirsk, OIGGM SO RAN Publ., 151 p.
- Pushkarev E.V. (2000) Petrology of the Uktusa dunite-clinopyroxenite-gabbro massif (Middle Urals). Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 296 p. (In Russ.)
- Pushkarev E.V., Anikina E.V., Garuti G., Zaccarini F. (2007) Chromium-platinum mineralization of the Nizhny Tagil type in the Urals: structural and material characteristics and problems of genesis. *Lithosphere (Russia)*, (3), 28-65. (In Russ.)
- Pushkarev E.V., Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Morozova A.V., Mironov A.B. (2016) Zonality and platinum-bearing chromitites of the Nizhny Tagil and Kytlymsky massif of the Platinum-bearing belt of the Urals according to oxythermobarometry data. *Ezhegodnik-2016. Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 163, 164-167. (In Russ.)
- Ramdor P. (1962) Ore minerals and their intergrowths. Moscow, Mir Publ., 1132 p. (In Russ.)
- Raub E. (1964) Die Ruthenium-Iridium-Legierungen. *Z. Metallkunde*, **55**(6), 316-319.
- Raub E., Plate W. (1956) Tempering and decomposition of platinum-iridium alloys. *Z. Metallkunde*, **47**, 688-693.
- Razin L.V. (2008) Industrially promising mineral resources potential of the Ural Platinum Belt. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 171 p. (In Russ.)
- Sharygin V.V., Mikhailov I.G. (2022) Tomamaeite Cu₃Pt in native osmium from river sediments in the Nizhneserginsky region, Middle Urals. *Mineralogiya*, **8**(2), 5-14. (In Russ.)
- Sidorov E.G., Kozlov A.P., Tolstykh N.D. (2012) Galmoe-nan mafic-ultrabasic massif and its platinum content. M.: Scientific world, 288 p. (In Russ.)

- Slansky E., Johan Z., Ohnenstetter M., Barron L.M.; Suppel D. (1991) Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, NSW, Australia. 2. Platinum-group minerals in placer deposits at Fifield. *Mineral. Petrol.*, **43**, 161-180.
- State geological map of the Russian Federation. (2005) Scale 1:200,000 (third generation). Ural series – Sheet O-40-VI. (In Russ.)
- Stepanov S.Yu. (2015) Comparative characteristics of platinum mineralization of Svetlogorsk, Veresovoborsky and Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite intrusions (Middle Urals, Russia). *Novye Dannye o Mineralakh*, **50**, 29-37. (In Russ.)
- Stepanov S.Yu. (2018) Structural and material patterns of chromite-platinum mineralization in clinopyroxenite-dunite massifs, Middle Urals. Cand. geol. and min. sci. diss. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 174 p. (In Russ.)
- Stepanov S.Yu., Malitch K.N., Kozlov A.V., Badanina I.Yu., Antonov A.V. (2017) Platinum mineralization of the Svetly Bor and Veresovy Bor clinopyroxenite-dunite massifs, Middle Urals (Russia). *Geol. Ore Depos.*, **59**(3), 244-255 (translated from *Geol. Rud. Mestorozh.*, **59**(3), 238-250).
- Stepanov S., Palamarchuk R., Kozlov A., Khanin D., Varlamov D., Kiseleva D. (2019) Platinum-Group Minerals of Pt-Placer Deposits Associated with the Svetloborsky Ural-Alaskan Type Massif, Middle Urals, Russia. *Minerals*, **9** (77), 1-25.
- Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Kozlov A.V., Khanin D.A., Antonov A.V. (2020) Platinum group minerals from the deluvial placer of the Veresovka River, Veresovoborsky clinopyroxenite–dunite massif (Middle Urals). *ZRMO*, **147**(5), 40-60. (In Russ.)
- Stepanov S.Yu., Puchkov V.N., Palamarchuk R.S., Varlamov D.A., Shilovskikh V.V., Kozlov A.V. (2021) The first finds of native iridium in indigenous chromite-platinum ores and placers of zonal clinopyroxenite-dunite massifs of the Urals. *Dokl. RAN*, **499**(2), 118-124. (In Russ.)
- Terent'ev V.F. (2003) Fatigue of metal materials. Moscow, Nauka Publ., 254 p. (In Russ.)
- Tolstykh N., Foley J.Y., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., (2002) Composition of the platinum-group minerals in the Salmon River plaser deposit, Goolnews Bay, Alaska. *Canad. Miner.*, **40**, 463-471.
- Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Baturin S.G. (1996) Features of the composition of native platinum from various associations of minerals of platinum group elements. *Russ. Geol. Geophys.*, **37**(3), 39-46. (In Russ.)
- Tolstykh N.D., Kozlov A.P., Telegin Yu.M. (2011) Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt. *Platinum of Russia*. V. VII, Krasnoyarsk, 297-312. (In Russ.)
- Tolstykh N.D., Kozlov A., Telegin Yu., (2015) Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt. *Ore Geol. Rev.*, **67**, 234-243.
- Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Krivenko A.P. (2005) Platinum-group element placers associated with Ural-Alaskan type complexes. *Miner. Assoc. Canada Short Course Ser.*, **35**. (Ed. J.E. Mungall). The Mineralogical Association of Canada, Quebec City, QC, Canada, 113-143.
- Vacher H.C., Bechtoldt C., Maxwell E. (1954) Structure of some iridium–osmium alloys. *Metals Trans.* AIME 200, 80.
- Volchenko Yu.A., Ivanov K.S., Koroteev V.A., Auger T. (2007) Structural and material evolution of complexes of the platinum belt of the Urals during the formation of chromite-platinum deposits of the Ural type. Pt I. *Lithosphere (Russia)*, (3), 3-27. (In Russ.)
- Volchenko Yu.A., Zoloev K.K., Koroteev V.A., Malakhov I.A., Mardirosoyan A.N. (1994) Platinum of the Urals, Platinum-mineralization and prospects for its development. *Izv. Vuzov. Gornyi Zhurnal*, **2**(6), 62-85. (In Russ.)
- Volchenko Yu.A., Zoloev K.K., Koroteev V.A., Mardirosoyan A.N., Neustroeva I.I. (1998) New and perspective types of platinum-metal mineralization in the Urals. *Geology and metallogeny of the Urals. B. I.* Ekaterinburg, 238-255. (In Russ.)
- Vysotskii N.K. (1923). About primary platinum deposits in the Urals and Siberia. *Izvestiya Geologicheskogo Komiteta*, (42), 15-21. (In Russ.)
- Yakubovich O.V., Mochalov A.G., Palamarchuk R.S., Vasilyeva N.A., Mostovaya M.E., Stewart F. (2021). Duration of formation of unique placer deposits of platinum metals (Konder river, Khabarovsk region and Is river, Middle Urals) according to the results of cosmogenic ³He dating. *Placers and deposits of weathering crusts of the XXI century: tasks, problems, solutions*. Materials of the XVI int. Meetings on the geology of placers and deposits of weathering crusts. Voronezh, Tsifrovaya poligrafiya, 104-105. (In Russ.)
- Zaccarini F., Garuti G., Pushkarev E.V. (2011) Unusually PGE-rich chromitite in the Butyrin vein of the Kytlym Uralian-Alaskan complex, Northern Urals, Russia. *Canad. Miner.*, **49**, 1413-1431.
- Zaccarini F., Garuti G., Pushkarev E., Thalhammer O. (2018) Origin of Platinum Group Minerals (PGM) Inclusions in Chromite Deposits of the Urals. *Minerals*, **8**(9), 379.
- Zaitsev A.M. (1889) Platinum deposits in the Urals. Tomsk, Tipolitografiya M.N. Kononova i I.F. Skulimovskogo, 75 p. (In Russ.)
- Zaykov V.V., Melekestseva I.Yu., Zaykova E.V., Kotlyarov V.A., Kraynev Y.D. (2017) Gold and platinum group minerals in placers of the South Urals: Composition, microinclusions of ore minerals and primary sources. *Ore Geol. Rev.*, **85**, 299-320.
- Zavaritskii A.N. (1928) Primary platinum deposits in the Urals. *Materials on general and applied geology*. Moscow, Publication of the Geological Committee, 108, 56 p. (In Russ.)
- Zhmodik S.M., Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Podlipsky M.Yu., Karmenov N.S. (2016) Alluvial platinum-group minerals as indicators of primary PGE mineralization (placers of southern Siberia). *Russ. Geol. Geophys.*, **57**(10), 1437-1464.