

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

### ПЕРВЫЕ НАХОДКИ МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В УЛЬТРАМАФИТАХ ИДЖИМСКОГО МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ЗАПАДНЫЙ САЯН)

© 2024 г. А. Н. Юричев<sup>1,\*</sup>, А. И. Чернышов<sup>1</sup>, Е. В. Корбояк<sup>1</sup>

*Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия*

*\*e-mail: juratur@yandex.ru*

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 27.12.2023 г.

В пластически деформированных гарцбургитах и дунитах Иджимского мафит-ультрамафитового массива, входящего в состав Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна и являющегося одним из наиболее крупных массивов данного пояса, впервые выявлены минералы платиновой группы (МПГ). Они обнаружены в виде тонкодисперсных включений в пентландите, аваруите и арсенидах никеля ( $\text{NiS}$ ,  $\text{Ni}_2\text{S}$ ). Диагностика включений выполнена только качественно. Идентифицированы самородный осмий, Ir-содержащий самородный осмий, самородный рутений, гаругиит, тетраферроплатина, неназванные фазы состава  $(\text{Pt}, \text{Ir})\text{Fe}$  и  $(\text{Ni}, \text{Cu}, \text{Pd}, \text{Pt})_{2-3}\text{Fe}$ , закариниит, Ir-содержащий эрлиманит и неназванные сульфиды с кристаллохимической формулой  $\text{Me}_2\text{S}$ . Все найденные зерна МПГ локализованы преимущественно в периферических частях зерен сульфидов, аваруите и вайрауите либо в силикатной матрице в непосредственной близости от этих минералов. Содержание элементов платиновой группы (ЭПГ) и их распределение в реститовых ультрамафитах, вероятно, контролировалось частичным плавлением первичного перидотитового субстрата. В ходе парциального плавления извлечение серы и платиноидов Pt-группы ( $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ ,  $\text{Rh}$ ) в силикатный расплав приводило к снижению фугитивности  $\text{S}_2$  и накоплению платиноидов Ir-группы ( $\text{Os}$ ,  $\text{Ir}$ ,  $\text{Ru}$ ) в моносульфидном твердом растворе (mss), из которого в последующем кристаллизовался первичный Os-Ir-содержащий пентландит. С его последующим преобразованием связано появление ЭПГ-содержащих аваруита и арсенидов никеля.

*Ключевые слова:* Западный Саян, Куртушибинский офиолитовый пояс, Иджимский массив, ультрамафиты, элементы платиновой группы, минералы платиновой группы

**DOI:** 10.31857/S0869605524010053, **EDN:** GUPDJY

Офиолитовый пояс Западного Саяна состоит из двух ветвей, выделяемых как самостоятельные пояса офиолитов (Соболев, Добрецов, 1977) (рис. 1). Реститовые ультрамафитовые массивы Куртушибинского офиолитового пояса пользуются широким распространением среди метаморфизованных осадочно-вулканогенных венд-кембрийских отложений и наблюдаются в виде тектонических блоков и пластин, окаймленных серпентинитовым меланжем. Объектом настоящего исследования является Иджимский мафит-ультрамафитовый массив, расположенный на юго-западном фланге Куртушибинского пояса (рис. 1).

Несмотря на то что он является одним из наиболее крупных тел, входящих в состав пояса, в его составе, в отличие от других массивов пояса (Эргакского, Калнинского, Кызыр-Бурлюкского), ранее благороднометалльная минерализация не диагностировалась (Юричев, Чернышов, 2019; Yurichev, Chernyshov, 2020; Юричев и др., 2021). Очевидно, последнее обстоятельство связано с отсутствием в составе массива хромитов, которые являются основным объектом минералогических исследований. В последние десятилетия появились работы по минералогии элементов платиновой группы (ЭПГ) во вмещающих реститовых ультрамафитах (Prichard et al., 1994; Zhou et al., 2001; Luguët et al., 2007; Ferraris, Lorand, 2015; Савельев, Философова, 2017; Савельев, Гатауллин, 2023, и др.). Было показано, что ЭПГ часто концентрируются в сульфидных из данных пород и ассоциируют с минералами никеля, меди и железа. Подобные исследования важны для понимания геохимического поведения сидерофильных элементов в верхней мантии.

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Иджимский мафит-ультрамафитовый массив локализован в юго-западной оконечности Куртушибинского офиолитового пояса (рис. 1). Он протягивается от р. Узюп до бассейна р. Коярд, имеет общую протяженность около 60 км при максимальной ширине до 8 км. На юго-востоке массив граничит с толщей терригенно-вулканогенно-карбонатных образований, которая датирована интервалом времени от позднего кембрия до среднего и позднего девона. Вдоль северо-западных границ массива широкой полосой обнажаются отложения вулканогенно-карбонатной толщи предположительно раннекембрийского возраста.

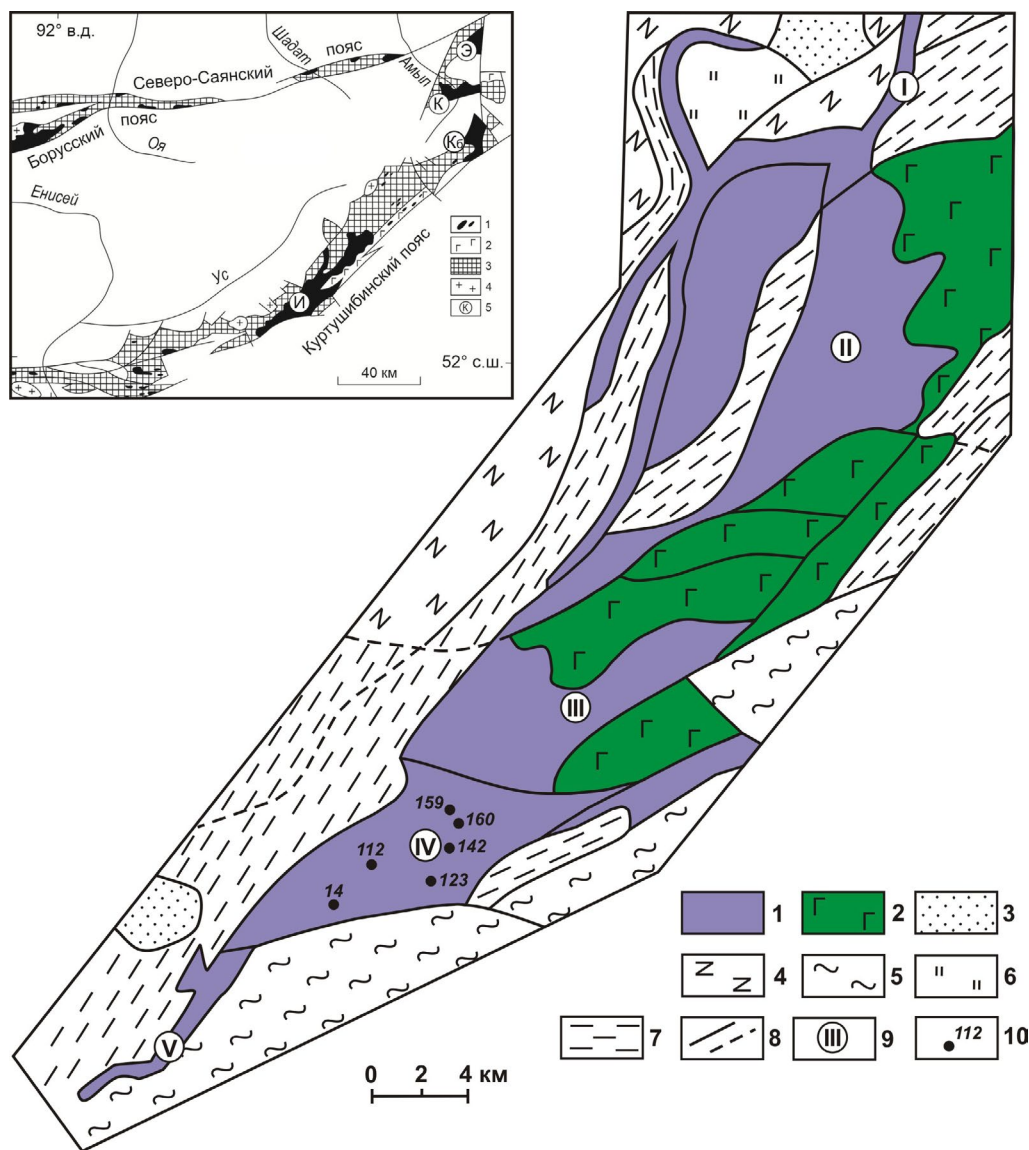
По данным А.К. Сибилева (1980) поперечными разломами северо-восточного простирания Иджимский массив разделен на тектонические блоки, получившие собственные названия (с северо-востока на юго-запад): Тиховский, Орешский (Коярдский), Омутьский, Иджимский и Синюхинский (рис. 1). Тиховский и Синюхинский блоки сложены преимущественно лизардит-антигорит-хризотилитовыми серпентинитами. Омутьский и Иджимский блоки представлены ультрамафитами — однородными (массивными) гарцбургитами (серпентинизированными гарцбургитами) и подчиненными им дунитами. В Орешском блоке обнажаются перемежающиеся тела дунит-гарцбургитового, пироксенитового и габброидного составов. Часто в дунитах и гарцбургитах наблюдаются следы интенсивных пластических деформаций.

Среди габброидов выделяются эвкритовые габбро, габбронориты и нормальные габбро. Родингиты как продукт метасоматического преобразования габброидов наиболее широко распространены в Орешском блоке (Леснов и др., 2019).

Во многих публикациях, посвященных Иджимскому массиву, особое внимание уделяется вопросам пространственно-временных взаимоотношений между входящими в его состав телами ультрамафитов и габброидов. В настоящее время доказано, что габброиды, инъецирующие гарцбургиты, дуниты и серпентиниты, образовались несколько позднее ультрамафитов, но, несмотря на перерыв в их формировании, имеют близкий (кембрийский) возраст (Добрецов, Пономарева, 1976; Леснов и др., 2005). В юго-восточной оконечности Иджимского массива ультрамафиты прорваны крупным интрузивом габбро и габбро-диоритов, имеющим ранне-среднекембрийский возраст.

Ряд исследователей относит Иджимский массив к сложным мафит-ультрамафитовым массивам полихронного (полигенного) формирования, входящим в состав офиолитовых ассоциаций (Пинус и др., 1973; Леснов, 1986; Леснов и др., 2019).

В пределах Иджимского массива расположено крупное Саянское месторождение хризотил-асбеста, а также менее крупное Сатпыйское месторождение (Сибилев, 1980).



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Иджимского массива (Гончаренко, 1989, с дополнениями авторов). I — ультрамафиты: гарцбургиты, дуниты, серпентиниты; 2 — габброиды (D); 3 — шиштыгская свита: песчаники ( $S_2$ ); 4 — амыльская свита: ортосланцы и парасланцы ( $E_2$ ); 5 — аласугская свита: метаморфизованные конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, сланцы ( $E_{2,3}$ ); 6 — терешкинская свита: алевролиты, кремни, туфопесчаники, туфоконгломераты, водорослевые известняки, порфиры и их туфы ( $E_1$ ); 7 — чингинская свита: спилит-диабазовая формация и углисто-кремнистые сланцы ( $E_1 ch_1$ ); 8 — линии тектонического контакта (сплошная — достоверная, пунктирная — предполагаемая); 9 — тектонические блоки: I — Тиховский, II — Орешский (Коярдский), III — Омудский, IV — Иджимский, V — Синюхинский; 10 — участки отбора проб.

На врезке схема расположения Иджимского массива в структуре Куртушибинского офиолитового пояса Западного Саяна (Сибилев, 1980; Симонов и др., 2022, с корректировками авторов).

I — ультрамафиты; 2 — габброиды, дайковый комплекс; 3 — диабазовая толща, углисто-кремнистые сланцы; 4 — посторогенные граниты; 5 — ультрамафитовые массивы (И — Иджимский, К — Калнинский, Э — Эргакский, Кб — Кызыр-Бурлюкский).

Объектом изучения явились пластически деформированные гарцбургиты и дуниты Иджимского блока. Последний является наиболее крупным из пяти выделенных блоков и, как отмечалось ранее, сложен преимущественно гарцбургитами и их в различной степени серпентинизированными разновидностями при резко подчиненной роли дунитов.

Макроскопически гарцбургиты представляют собой мелко-среднезернистые породы серого, темно-серого цвета, нередко с неравномерными белыми примазками вследствие частичного замещения серпентином. Текстура пород массивная. Под микроскопом они обнаруживают исходную гипидиоморфнозернистую структуру, образованную идиоморфным оливином (0.1–2.0 мм) и более ксеноморфным по отношению к нему ортопироксеном (до 3 см) (рис. 2, *а–б*). Первичная структура обычно осложнена наложенной пластической деформацией, нередко с образованием порфи-рокластовой структуры.

Первичный минеральный состав: оливин 75–95%, ортопироксен 25–5%. Содержание клинопироксена изменяется от единичных зерен до 3%, хромшпинели достигает 4%. Оливин представлен форстеритом ( $Fa$  — 8.5–9.7 мол. %), ортопироксен — энстатитом ( $En$  — 87.1–88.8 мол. %,  $Fs$  — 8.0–9.2 мол. %,  $Wo$  — 2.5–4.4 мол. %), клинопироксен — диопсидом ( $En$  — 47.5–50.4 мол. %,  $Fs$  — 3.2–4.1 мол. %,  $Wo$  — 45.7–49.3 мол. %), хромшпинель — преимущественно субферриалюмохромитом и в меньшей степени субальюмоферрихромитом (табл. 1–3, рис. 3, *а*). Из вторичных минералов кроме серпентина в гарцбургитах отмечены тремолит, тальк, хлорит, брусит и магнетит.

Дуниты представляют собой мелко-среднезернистые породы от светло-серого (слабо серпентинизированные дуниты) до бутылочно-зеленого (сильно серпентинизированные дуниты) цвета, нередко с ровной желтовато-бурой корочкой выветривания. Текстура пород массивная. Структура слабо измененных дунитов панидиоморфнозернистая, образуемая полигональными и изометричными зернами оливина размером 0.5–2.0 мм в поперечнике; в измененных разновидностях — петельчатая. В отдельных образцах отмечается парфиролейстовая структура, характеризующаяся присутствием вытянутых, удлинённых индивидов оливина, имеющих предпочтительную ориентировку (рис. 2, *в*). Кроме форстерита (содержание более 95%,  $Fa$  — 6.7–7.0 мол. %), небольших редких примесей энстатита (содержание до 3%) и хромшпинелида, представленного преимущественно субферрихромитом (содержание до 2.0%) в дунитах, как правило, присутствуют серпентин, брусит, тальк и магнетит (табл. 1; табл. 3; рис. 3, *а*).

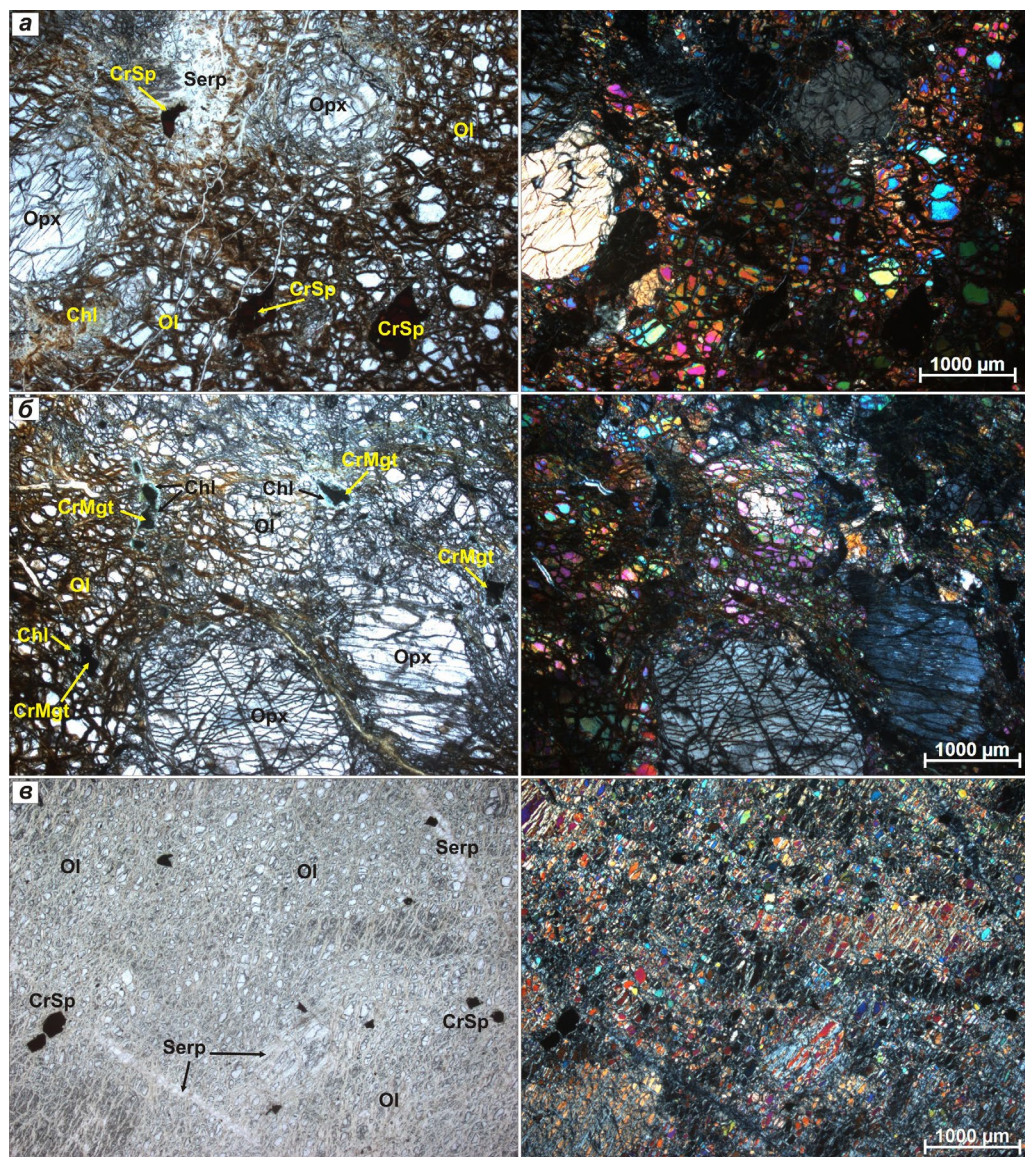
Гарцбургиты и дуниты обычно несут следы интенсивных пластических деформаций, проявляющихся в неоднородном волнистом погасании и наличии полос пластического излома в зернах оливина, в изгибе трещин спайности и появлении неоднородного волнистого погасания в зернах ортопироксена (Гончаренко, 1989).

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Idzhim massif (Goncharenko, 1989, with additions by authors).

1 — ultramafic rocks: harzburgites, dunites, serpentinites; 2 — gabbroides (D); 3 — Shishtyk Formation: sandstones ( $S_1$ ); 4 — Amyl Formation: orthoschists and paraschists ( $E_2$ ); 5 — Alasug Formation: metamorphosed conglomerates, gravelstones, sandstones, siltstones, shales ( $E_{2,3}$ ); 6 — Tereshkinskaya Formation: siltstones, cherts, tuff sandstones, tuff conglomerates, algal limestones, porphyrites and their tuffs ( $E_1$ ); 7 — Chinga Formation: spilite-diabase formation and carbonaceous-siliceous shales ( $E_1ch_1$ ); 8 — lines of tectonic contact (solid — reliable, dotted — assumed); 9 — tectonic blocks (I — Tikhovsky, II — Oreshsky (Koyardsky), III — Omulsky, IV — Idzhimsky, V — Sinyukhinsky); 10 — sampling sites.

The inset shows of the Idzhim massif in structure of the Kurtushiba ophiolite belt of Western Sayan (Sibilev, 1980; Simonov et al., 2022, with corrections by authors).

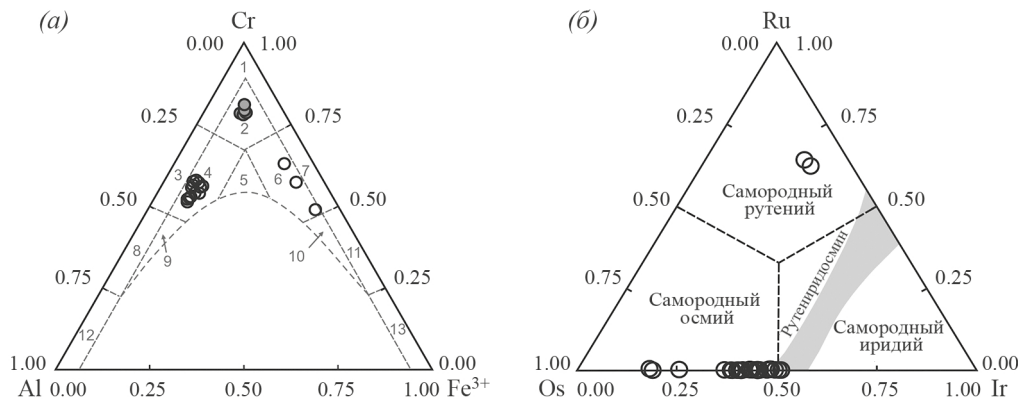
1 — ultramafites; 2 — gabbroides, dike complex; 3 — diabase sequence, carbonaceous-siliceous shales (Chinga and Nizhnii Monok formations); 4 — postorogenic granites; 5 — ultramafic massifs (И — Idzhim, К — Kalninsky, Е — Ergaksky, К6 — Kizir-Burluksky).



**Рис. 2.** Микрофотографии пластически деформированных ультрамафитов без анализатора (слева) и с анализатором (справа).

*a–б* — гипидиоморфнозернистые гарцбургиты (обр. 14 и обр. 112 соответственно), *в* — порфиroleйстовый дунит (обр. 160). Ol — оливин, Opx — ортопироксен, Serp — серпентин, Chl — хлорит, CrSp — хромшпинель, CrMgt — хроммагнетит.

**Fig. 2.** Micrographs of plastically deformed ultramafites without analyzer (left) and with analyzer (right). *a–б*, hypidiomorphic grained harzburgites (samples 14 and 112, respectively), *c*, porphyroleistic dunite (sample 160). Ol — olivine, Opx — orthopyroxene, Serp — serpentine, Chl — chlorite, CrSp — chrome spinel, CrMgt — chromomagnetite.



**Рис. 3.** Тернарные диаграммы для ультрамафитов Иджимского массива.  
*a* — состав акцессорных хромшпинелидов из гарцбургитов (белые кружки) и дунитов (серые кружки) на классификационной диаграмме Н.В. Павлова (1949) (1 — хромит, 2 — субферрихромит, 3 — алюмохромит, 4 — субферриалюмохромит, 5 — ферриалюмохромит; 6 — субалюмоферрихромит; 7 — феррихромит; 8 — хромпикотит; 9 — субферрихромпикотит, 10 — субалюмохроммагнетит, 11 — хроммагнетит, 12 — пикотит, 13 — магнетит); *б* — состав микровключений МПГ Os–Ir–Ru в пентландите и аварuite из гарцбургитов на классификационном треугольнике (Harris, Cabri, 1991).

**Fig. 3.** Ternary diagrams for ultramafites of the Idzhim massif.  
*a*, composition of accessory chromspinelides from harzburgite (white circles) and dunite (gray circles) on classification diagram by N.V. Pavlov (1949) (1 — chromite, 2 — subferrichromite, 3 — aluminochromite, 4 — subferriallumochromite, 5 — ferriallumochromite, 6 — subaluminoferrichromite, 7 — ferrichromite, 8 — chrompicotite, 9 — subferrichromopicotite, 10 — subalumochromomagnetite, 11 — chromomagnetite, 12 — picotite, 13 — magnetite); *б*, composition of microinclusions of Os–Ir–Ru in pentlandite and avaruite from harzburgites on epy classification triangle (Harris, Cabri, 1991).

**Таблица 1.** Химический состав оливина (мас. %) из ультрамафитов  
**Table 1.** Chemical composition of olivine (wt %) from ultramafite

| Оксид            | Гарцбургит |       |       |       |       |        |       |        |       |        | Дунит  |        |
|------------------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                  | 10-5       | 10-18 | 14-15 | 14-31 | 112-6 | 112-14 | 123-5 | 123-16 | 142-5 | 142-10 | 160-12 | 160-17 |
| MgO              | 47.89      | 48.09 | 48.67 | 48.59 | 48.87 | 48.82  | 49.15 | 49.17  | 49.37 | 48.86  | 51.42  | 50.75  |
| SiO <sub>2</sub> | 39.26      | 39.17 | 39.65 | 39.49 | 40.32 | 40.09  | 40.21 | 39.94  | 40.15 | 39.90  | 41.14  | 40.72  |
| MnO              | 0.13       | 0.17  | 0.0   | 0.17  | 0.15  | 0.14   | 0.14  | 0.18   | 0.0   | 0.13   | 0.0    | 0.0    |
| FeO              | 8.80       | 8.73  | 8.07  | 8.26  | 9.28  | 9.62   | 8.97  | 8.91   | 9.01  | 9.09   | 6.88   | 7.01   |
| NiO              | 0.37       | 0.40  | 0.42  | 0.41  | 0.43  | 0.44   | 0.42  | 0.50   | 0.43  | 0.37   | 0.38   | 0.48   |
| Сумма            | 96.45      | 96.56 | 96.81 | 96.92 | 99.05 | 99.11  | 98.89 | 98.70  | 98.96 | 98.35  | 99.82  | 98.96  |
| Fa               | 9.34       | 9.23  | 8.48  | 8.67  | 9.40  | 9.71   | 9.08  | 9.04   | 9.07  | 9.28   | 6.76   | 7.02   |

Примечание. Fa — содержание фаялитовой молекулы, Fa = [Fe/(Fe+Mg)] × 100.

**Таблица 2.** Химический состав энстатита и диопсида (мас. %) из гарцбургитов

**Table 2.** Chemical composition of enstatite and diopside (wt %) from harzburgite

| Оксид    | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | FeO  | Сум-<br>ма | En    | Fs   | Wo    |
|----------|-------|--------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|------|------|------------|-------|------|-------|
| Энстатит |       |                                |                  |       |                                |      |      |            |       |      |       |
| 10-21    | 31.70 | 2.23                           | 54.03            | 2.22  | 0.69                           | 0.21 | 5.54 | 96.62      | 87.08 | 8.54 | 4.38  |
| 10-25    | 31.93 | 2.23                           | 54.13            | 1.52  | 0.71                           | 0.13 | 5.74 | 96.39      | 88.10 | 8.89 | 3.02  |
| 14-28    | 32.41 | 2.21                           | 54.29            | 1.53  | 0.71                           | 0.15 | 5.28 | 96.58      | 88.86 | 8.12 | 3.02  |
| 14-38    | 32.37 | 2.16                           | 54.54            | 1.82  | 0.75                           | 0.12 | 5.23 | 96.99      | 88.41 | 8.02 | 3.57  |
| 112-28   | 32.29 | 2.82                           | 54.79            | 1.43  | 0.85                           | 0.12 | 6.04 | 98.34      | 87.97 | 9.23 | 2.80  |
| 112-32   | 32.49 | 2.72                           | 54.80            | 1.36  | 0.88                           | 0.14 | 6.02 | 98.41      | 88.18 | 9.17 | 2.65  |
| 123-24   | 33.05 | 2.47                           | 55.52            | 1.45  | 0.74                           | 0.0  | 5.83 | 99.06      | 88.45 | 8.76 | 2.79  |
| 123-30   | 33.11 | 2.46                           | 55.35            | 1.27  | 0.73                           | 0.18 | 5.86 | 98.96      | 88.74 | 8.81 | 2.45  |
| 142-18   | 33.14 | 2.43                           | 55.41            | 1.39  | 0.71                           | 0.13 | 5.94 | 99.15      | 88.44 | 8.90 | 2.67  |
| 142-31   | 33.23 | 2.57                           | 55.44            | 1.45  | 0.77                           | 0.14 | 5.75 | 99.35      | 88.62 | 8.60 | 2.78  |
| Диопсид  |       |                                |                  |       |                                |      |      |            |       |      |       |
| 10-29    | 16.57 | 2.77                           | 50.88            | 22.75 | 1.14                           | 0.0  | 2.50 | 96.61      | 48.27 | 4.09 | 47.65 |
| 10-35    | 17.39 | 2.41                           | 51.26            | 21.92 | 1.10                           | 0.0  | 2.40 | 96.48      | 50.41 | 3.90 | 45.69 |
| 14-16    | 17.11 | 2.57                           | 52.00            | 22.41 | 1.12                           | 0.0  | 2.06 | 97.27      | 49.77 | 3.36 | 46.87 |
| 14-18    | 16.99 | 2.57                           | 51.94            | 22.59 | 1.20                           | 0.0  | 2.02 | 97.31      | 49.44 | 3.30 | 47.26 |
| 112-8    | 16.82 | 2.84                           | 52.51            | 23.59 | 1.15                           | 0.0  | 2.32 | 99.23      | 47.94 | 3.71 | 48.34 |
| 112-16   | 17.37 | 2.59                           | 52.3             | 22.82 | 1.06                           | 0.0  | 2.45 | 98.59      | 49.41 | 3.91 | 46.67 |
| 123-19   | 16.39 | 3.27                           | 51.74            | 23.68 | 1.27                           | 0.0  | 1.97 | 98.32      | 47.48 | 3.20 | 49.32 |
| 123-32   | 16.74 | 3.09                           | 51.91            | 22.94 | 1.22                           | 0.0  | 2.43 | 98.33      | 48.39 | 3.94 | 47.67 |
| 142-24   | 16.79 | 2.91                           | 52.47            | 23.30 | 1.20                           | 0.0  | 2.23 | 98.90      | 48.26 | 3.60 | 48.15 |
| 142-30   | 17.09 | 3.08                           | 52.64            | 23.19 | 1.12                           | 0.0  | 2.32 | 99.44      | 48.74 | 3.71 | 47.55 |

**Примечание.** En — содержание энстатитовой молекулы,  $En = [Mg / (Mg + Fe + Ca)] \times 100$ ; Fs — содержание ферросиллитовой молекулы,  $Fs = [Fe / (Mg + Fe + Ca)] \times 100$ ; Wo — содержание волластонитовой молекулы,  $Wo = [Ca / (Mg + Fe + a)] \times 100$ ; «—» — элемент не обнаружен.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Зерна минералов платиновой группы и их агрегаты изучались в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 LMU с энерго-дисперсионным анализатором UltimMax100 (Oxford Instruments). Были исследованы 5 образцов гарцбургитов и 2 образца дунита. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, силе тока пучка электронов 4.5 нА и времени накопления спектра в точке 60 секунд в режиме Point&ID (2 000 000 импульсов). Диаметр пучка зонда составлял 1–2 мкм. Чувствительность анализа в точке ( $\sim 1 \text{ мкм}^3$ ) — до

**Таблица 3.** Химический состав акцессорного хромшпинелида (мас. %) из ультрамафитов  
**Table 3.** Chemical composition of accessory chromspinelide (wt %) from ultramafite

| Ок-сид                         | Гарцбургит |       |       |       |       |        |       |        |       |        | Дунит  |        |
|--------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                                | 10-3       | 10-9  | 14-2  | 14-9  | 112-2 | 112-11 | 123-2 | 123-13 | 142-1 | 142-13 | 160-1  | 160-3  |
| MgO                            | 12.87      | 12.85 | 13.81 | 13.65 | 12.71 | 12.90  | 13.73 | 13.97  | 14.08 | 14.13  | 10.55  | 10.01  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.68      | 26.94 | 26.69 | 25.85 | 26.18 | 27.02  | 28.89 | 29.22  | 29.00 | 29.84  | 9.26   | 9.37   |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.27       | 0.30  | 0.21  | 0.30  | 0.32  | 0.35   | 0.25  | 0.31   | 0.27  | 0.23   | 0.0    | 0.0    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 41.85      | 40.56 | 42.17 | 43.06 | 42.33 | 41.53  | 40.35 | 39.88  | 40.40 | 39.68  | 62.69  | 62.69  |
| FeO <sub>tot</sub>             | 17.10      | 17.31 | 14.58 | 14.85 | 17.41 | 17.78  | 16.50 | 16.13  | 16.14 | 15.83  | 17.81  | 18.35  |
| ZnO                            | 0.17       | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.17  | 0.26   | 0.23  | 0.22   | 0.0   | 0.18   | 0.0    | 0.0    |
| Сум-ма                         | 97.94      | 97.96 | 97.46 | 97.71 | 99.12 | 99.84  | 99.95 | 99.73  | 99.89 | 99.89  | 100.31 | 100.42 |
| Cr#                            | 62.42      | 60.55 | 61.70 | 62.94 | 62.24 | 61.04  | 58.74 | 58.18  | 58.68 | 57.55  | 87.34  | 87.21  |

Примечание. Cr# — хромистость, FeO<sub>tot</sub> — суммарное железо.

0.05 мас. %. В качестве стандартов для Ru, Os, Ir, Re, Rh, Pt, Pd, Ni, Co, Cu, Fe и Sb были применены чистые металлы, для S — пирит, для As — сперриллит. Использованы аналитические линии: L $\alpha$  для Ru, Ir, Re, Rh, Pt, Pd, Sb; K $\alpha$  для S, Fe, Ni, Co, Cu As; M $\alpha$  для Os. Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ.

Сокращением «н.о.» (не обнаружен) в таблицах химического состава минералов обозначены измерения ниже чувствительности микроанализа (первые сотые доли массового процента).

Все анализы выполнены в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитик Е.В. Корбояк. Проанализировано около 60 микровключений МПГ, а также около 50 зерен аваруита, пентландита и арсенидов никеля, содержащих примеси ЭПГ.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭПГ В ПОРОДАХ МАССИВА

Изначально были детально исследованы акцессорные хромшпинелиды из пластически деформированных гарцбургитов и дунитов. Примесей ЭПГ и включений МПГ в них не обнаружено.

При микроскопическом изучении шлифов были встречены акцессорные сульфиды (пентландит и его кобальтсодержащая разновидность, аргентит, халькопирит, галенит, сфалерит, миллерит), аваруит (Ni<sub>2-3</sub>Fe), вайраут (CoFe), самородные элементы (самородные серебро, железо и никель, медистое золото), неназванные интерметаллические соединения (Cu—Co, Zn—Cu, Cu—Pb). В дунитах также были отмечены арсениды никеля, ртути и сурьмы.

По данным анализов, примеси ЭПГ отмечаются в пентландите и аваруите из гарцбургитов, значительно реже — в арсенидах никеля (NiS, Ni<sub>2</sub>S) из дунитов (табл. 4). Если пентландит содержит примесь осмия (до 11.8 мас. %) и иридия (до 4.6 мас. %), то в арсенидах никеля примесями ЭПГ выступают преимущественно рутений (до 11.2 мас. %) и родий (до 3.9 мас. %). Аваруит обнаруживает более широкий набор при-

**Таблица 4.** Химический состав аксессуарных ЭПГ-содержащих минералов (мас. %) из пластически деформированных гарцбургитов и дунитов

**Table 4.** Chemical composition of accessory PGE-bearing minerals (wt %) from plastically deformed harzburgite and dunite

| Образец                                 | Ru   | Os    | Ir    | Rh   | Pt    | Ni    | Co   | Fe    | S     | As  | Sb  | Сумма  |
|-----------------------------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-----|-----|--------|
| Аваруит $Ni_{2-3}Fe$ (первая генерация) |      |       |       |      |       |       |      |       |       |     |     |        |
| 112-104                                 | н.о. | 12.29 | н.о.  | н.о. | н.о.  | 63.82 | н.о. | 23.54 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.65  |
| 112-205                                 | н.о. | 11.74 | н.о.  | н.о. | н.о.  | 64.65 | н.о. | 23.82 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.21 |
| 123-99                                  | н.о. | 4.34  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 68.78 | н.о. | 26.53 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.65  |
| 123-100                                 | н.о. | 1.51  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 72.03 | н.о. | 25.09 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 98.63  |
| 123-102                                 | н.о. | 9.14  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 64.88 | н.о. | 25.53 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.54  |
| 123-105                                 | н.о. | 8.72  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 66.91 | н.о. | 24.58 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.20 |
| 123-106                                 | н.о. | 3.43  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 71.10 | н.о. | 25.57 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.10 |
| Аваруит $Ni_{2-3}Fe$ (вторая генерация) |      |       |       |      |       |       |      |       |       |     |     |        |
| 14-103                                  | 1.05 | н.о.  | 9.13  | 1.17 | н.о.  | 62.72 | 2.19 | 22.63 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 98.90  |
| 14-104                                  | 1.65 | н.о.  | 8.13  | 0.46 | н.о.  | 63.63 | 3.24 | 22.76 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.87  |
| 14-105                                  | 0.44 | н.о.  | 7.60  | 0.37 | н.о.  | 62.65 | 3.33 | 25.02 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.40  |
| 14-106                                  | 0.40 | н.о.  | 8.45  | 0.39 | н.о.  | 59.70 | 3.53 | 27.70 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.17 |
| 14-115                                  | 2.01 | н.о.  | 13.57 | н.о. | н.о.  | 54.29 | 4.41 | 25.40 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.67  |
| 14-120                                  | н.о. | н.о.  | 4.00  | н.о. | 8.40  | 61.02 | 3.06 | 23.57 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.04 |
| 14-124                                  | н.о. | н.о.  | 2.46  | н.о. | 8.06  | 62.70 | 3.01 | 23.75 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.97  |
| 14-137                                  | н.о. | н.о.  | н.о.  | н.о. | 7.47  | 65.71 | 2.27 | 24.73 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.18 |
| 14-138                                  | н.о. | н.о.  | н.о.  | н.о. | 6.04  | 66.34 | 2.35 | 25.00 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.73  |
| 14-139                                  | н.о. | н.о.  | н.о.  | н.о. | 9.87  | 62.11 | 2.52 | 25.52 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 100.02 |
| 14-140                                  | н.о. | н.о.  | н.о.  | н.о. | 10.27 | 61.37 | 2.32 | 25.67 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.63  |
| 160-54                                  | 0.73 | н.о.  | н.о.  | 0.33 | н.о.  | 76.77 | н.о. | 21.48 | 0.0   | 0.0 | 0.0 | 99.32  |
| Пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$               |      |       |       |      |       |       |      |       |       |     |     |        |
| 112-117                                 | н.о. | 0.90  | 0.88  | н.о. | н.о.  | 25.86 | 2.32 | 37.46 | 32.59 | 0.0 | 0.0 | 100.01 |
| 112-120                                 | н.о. | 1.95  | 2.04  | н.о. | н.о.  | 24.73 | 2.07 | 36.91 | 32.09 | 0.0 | 0.0 | 99.79  |
| 112-121                                 | н.о. | 1.36  | 1.25  | н.о. | н.о.  | 25.44 | 2.30 | 37.33 | 32.38 | 0.0 | 0.0 | 100.06 |
| 112-158                                 | н.о. | 2.72  | 3.75  | н.о. | н.о.  | 23.26 | 2.04 | 36.52 | 31.63 | 0.0 | 0.0 | 99.92  |
| 112-159                                 | н.о. | 3.34  | 3.10  | н.о. | н.о.  | 23.29 | 2.07 | 36.17 | 31.36 | 0.0 | 0.0 | 99.33  |
| 112-167                                 | н.о. | 6.43  | 3.84  | н.о. | н.о.  | 18.42 | 4.96 | 34.96 | 31.17 | 0.0 | 0.0 | 99.77  |
| 112-168                                 | н.о. | 4.88  | 3.09  | н.о. | н.о.  | 18.95 | 5.03 | 35.81 | 31.95 | 0.0 | 0.0 | 99.72  |
| 112-169                                 | н.о. | 7.26  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 19.67 | 5.37 | 37.04 | 30.44 | 0.0 | 0.0 | 99.79  |

| Образец | Ru   | Os    | Ir   | Rh   | Pt   | Ni    | Co   | Fe    | S     | As  | Sb  | Сумма  |
|---------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-----|-----|--------|
| 112-170 | н.о. | 2.40  | н.о. | н.о. | н.о. | 21.19 | 5.93 | 38.36 | 32.45 | 0.0 | 0.0 | 100.34 |
| 112-182 | н.о. | 5.00  | 3.30 | н.о. | н.о. | 18.69 | 6.23 | 33.97 | 32.03 | 0.0 | 0.0 | 99.22  |
| 112-184 | н.о. | 2.76  | 1.50 | н.о. | н.о. | 19.31 | 5.31 | 37.27 | 33.39 | 0.0 | 0.0 | 99.54  |
| 112-183 | н.о. | 2.66  | 0.89 | н.о. | н.о. | 21.24 | 5.17 | 38.70 | 32.58 | 0.0 | 0.0 | 101.24 |
| 123-107 | н.о. | 2.72  | н.о. | н.о. | н.о. | 25.31 | н.о. | 38.22 | 32.00 | 0.0 | 0.0 | 98.26  |
| 123-51  | н.о. | 4.54  | 4.65 | н.о. | н.о. | 26.72 | н.о. | 33.99 | 30.26 | 0.0 | 0.0 | 100.16 |
| 123-103 | н.о. | 5.59  | 1.94 | н.о. | н.о. | 22.72 | н.о. | 38.20 | 30.80 | 0.0 | 0.0 | 99.25  |
| 142-216 | н.о. | 4.58  | н.о. | н.о. | н.о. | 26.27 | н.о. | 36.47 | 31.52 | 0.0 | 0.0 | 98.84  |
| 142-222 | н.о. | 11.82 | 2.25 | н.о. | н.о. | 22.69 | н.о. | 33.06 | 29.93 | 0.0 | 0.0 | 99.74  |
| 142-224 | н.о. | 8.61  | 2.00 | н.о. | н.о. | 22.59 | н.о. | 35.17 | 30.47 | 0.0 | 0.0 | 99.34  |

Фаза Ni<sub>2</sub>As

|        |       |      |      |      |      |       |      |      |     |       |      |        |
|--------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|-----|-------|------|--------|
| 160-55 | 0.96  | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | 60.24 | н.о. | н.о. | 0.0 | 38.21 | н.о. | 99.41  |
| 160-56 | 11.12 | н.о. | 1.93 | н.о. | н.о. | 50.38 | н.о. | н.о. | 0.0 | 35.32 | н.о. | 98.75  |
| 160-61 | н.о.  | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | 56.82 | 1.42 | н.о. | 0.0 | 41.37 | 0.43 | 100.04 |
| 160-62 | 0.91  | н.о. | н.о. | н.о. | н.о. | 56.18 | н.о. | н.о. | 0.0 | 41.66 | 0.35 | 99.10  |

Никколит NiAs

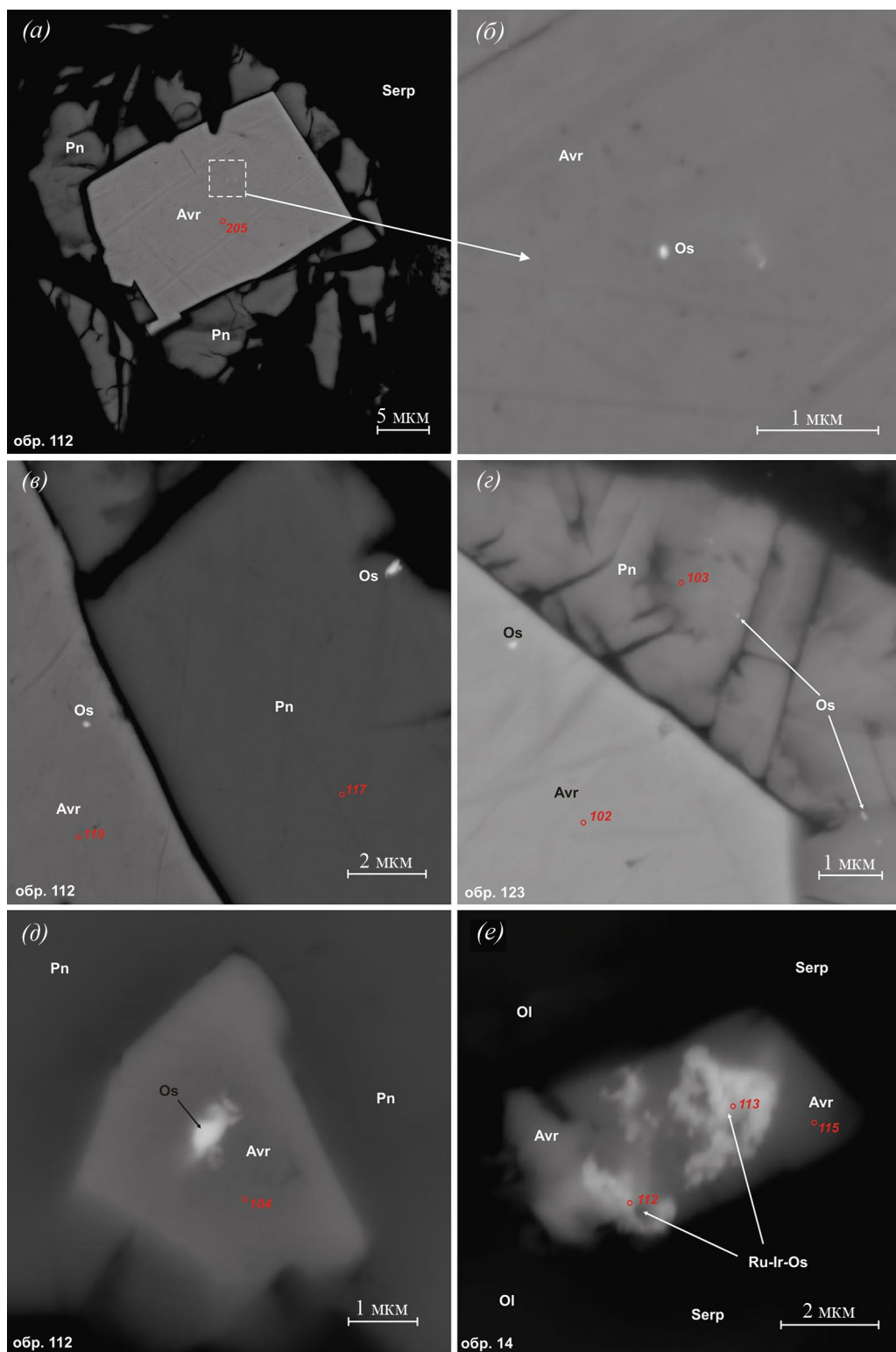
|        |      |      |      |      |      |       |      |      |     |       |      |       |
|--------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-----|-------|------|-------|
| 160-59 | 2.07 | н.о. | н.о. | 2.18 | н.о. | 44.31 | н.о. | н.о. | 0.0 | 50.62 | н.о. | 99.17 |
| 160-60 | 2.71 | н.о. | н.о. | 3.87 | н.о. | 41.76 | н.о. | н.о. | 0.0 | 50.96 | н.о. | 99.30 |

Примечание. Здесь и далее в других таблицах «н.о.» обозначает содержание элемента ниже предела обнаружения рентгеноспектрального микроанализа. Для примесей ЭПГ из пентландита и аварита пределы обнаружения составили (мас. %): Os — 0.13, Ir — 0.16, Ru — 0.10, Rh — 0.09, Pt — 0.27, Ni — 0.14, Co — 0.11, Fe — 0.16, S — 0.04. Для примесей ЭПГ из арсенидов никеля пределы обнаружения составили (мас. %): Os — 0.13, Ir — 0.22, Ru — 0.06, Rh — 0.05, Pt — 0.27, Ni — 0.15, Co — 0.05, Fe — 0.06, As — 0.15.

месей ЭПГ, включающий иридий (до 13.6 мас. %), осмий (до 12.3 мас. %), платину (до 10.3 мас. %), рутений (до 2.0 мас. %) и родий (до 1.2 мас. %). При этом все пять элементов не встречаются одновременно в пределах одного зерна. В зернах с высокой степенью идиоморфизма, часто находящихся в непосредственном контакте с зернами пентландита, обнаруживается только примесь Os. В обособленных гипидиоморфных, ксеноморфных и комковидных зернах аварита из серпентинитового цемента диагностируются четыре набора ЭПГ: Ir–Ru–Rh, Ru–Rh, Pt–Ir и Pt.

**Рис. 4.** Микровключения МПГ Os–Ir–Ru в пентландите и аварите из пластически деформированных гарцбургитов. Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов. Авт — аварит (Ni<sub>2-3</sub>Fe), Пн — пентландит (Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>, Ол — оливин, Серп — серпентин. Красный кружок с цифрой — мишень анализа и его номер.

**Fig. 4.** Microinclusions of Os–Ir–Ru in pentlandites and avarites from plastically deformed harzburgites. BSE images. Avr — avaruite (Ni<sub>2-3</sub>Fe), Pn — pentlandite (Fe,Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>, Ol — olivine, Serp — serpentine. The red circle with number is a target of analysis and its number.



Минералы платиновой группы наблюдаются в виде гипидиоморфных и неправильных по форме включений в зернах пентландита и аваруита, значительно реже — в силикатной матрице. Размер включений — до 5 мкм. По составу они разделяются на две группы: минералы самородных элементов и сульфиды. В составе выделенных групп отмечены в основном минералы Ir-группы (Ir, Os, Ru). Минералы Pt-группы представлены только тетраферроплатиной (PtFe), закариниитом (RhNiAs) и неназванными фазами — (Pt,Ir)Fe и (Ni,Cu,Pd,Pt)<sub>2-3</sub>Fe.

## РАЗНОВИДНОСТИ МПГ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

**Минералы самородных элементов.** Данная группа распространена наиболее широко и представлена самородным осмием, самородным рутением, гарутиитом, тетраферроплатиной, неназванными фазами (Pt,Ir)Fe и (Ni,Cu,Pd,Pt)<sub>2-3</sub>Fe и закариниитом.

Самородный осмий является самым распространенным МПГ, наблюдается в виде неправильных включений размером до 2 мкм внутри зерен пентландита и кобальтистого пентландита, реже — аваруита и вайрауита (табл. 5, рис. 4–5). Наиболее насыщен включениями пентландит. В большинстве случаев это неравномерная «сыпь» обособленных тонкодисперсных включений (рис. 4, а–д; рис. 5, д), иногда — однородная вкрапленность с формированием своеобразной «пудинговой» структуры (рис. 5, е). Ранее аналогичная структура была отмечена в породах офиолитового комплекса полуострова Камчатский мыс (Савельев, Философова, 2017).

В большинстве случаев, из-за незначительных размеров выделений самородного осмия, его идентификация выполнялась только качественно. Более крупные микровключения (~2 мкм) были проанализированы количественно (табл. 5). В составе самородного осмия постоянно отмечается примесь иридия (до 49.6 мас. %), иногда — никеля (до 3.6 мас. %). Отмечено, что наиболее «чистый» от примесей самородный осмий (содержание Os > 80 мас. %) наблюдается в идиоморфных зернах аваруита и пентландита, контактирующих друг с другом (табл. 5, ан. 3–4).

Самородный рутений встречается реже. Он изучен на примере нескольких губчатых, преимущественно дезинтегрированных на ряд сегментов включений в зернах Ru–Ir-содержащего аваруита (рис. 4, е). Зерна минерала характеризуются гипидиоморфным обликом и достигают размера 3 мкм. В его химическом составе обнаруживаются примеси иридия (до 40 мас. %) и осмия (до 15.2 мас. %) (табл. 5, ан. 1–2).

Гарутиит (NiFeIr) отмечается в виде неправильных (ксеноморфных) включений размером до 5 мкм в тесной ассоциации с Ir–Pt-содержащим аваруитом в основной силикатной матрице. Часто по нему развивается близкий по набору катионов неназванный сульфид, отвечающего стехиометрической формуле Me<sub>2</sub>S (рис. 6, в). В химическом составе минерала постоянно обнаруживается примесь рутения (до 7.4 мас. %) и кобальта (до 2.1 мас. %) (табл. 6).

Единожды гарутиит диагностирован в виде тонкодисперсных включений в самородной меди (рис. 6, б, табл. 6, ан. 1–2). Идентификация фазы выполнена на основе суммарного химического состава изучаемого минерала и вмещающей его самородной меди путем расчетного исключения из состава содержаний меди, никеля и железа, характерных для самородной меди (Cu — 94.5 мас. %, Ni — 2.6 мас. %, Fe — 1.7 мас. %). Такой гарутиит, в отличие от более крупных включений, характеризуется стерильностью в отношении других химических элементов и не обнаруживает в своем составе примеси рутения и кобальта (табл. 6).

Тетраферроплатина (PtFe) наблюдается в виде гипидиоморфных включений (размером до 4 мкм) в зернах Pt–Ir-содержащего аваруита (рис. 6, з). Здесь же отмечен неназванный минерал с формулой (Pt,Ir)Fe (содержание Ir до 17.6 мас. %) (табл. 6). Ранее подобный минерал, но с несколько меньшим содержанием иридия

**Таблица 5.** Химический состав микровключений МПГ Os–Ir–Ru (мас. %) в пентландите и аварuite из пластически деформированных гарцбургитов

**Table 5.** Chemical composition of microinclusions of Os–Ir–Ru (wt %) in pentlandite and avaruite from plastically deformed harzburgite

| № п/п              | Образец | Ru    | Os    | Ir    | Ni   | Сумма  | Формула                                                     | Форма на-<br>хождения                                                          |
|--------------------|---------|-------|-------|-------|------|--------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Самородный рутений |         |       |       |       |      |        |                                                             |                                                                                |
| 1                  | 14-112  | 46.22 | 13.97 | 39.98 | н.о. | 100.17 | (Ru <sub>0.62</sub> Ir <sub>0.28</sub> Os <sub>0.10</sub> ) | Губчатые<br>включения в<br>аваруите II                                         |
| 2                  | 14-113  | 48.43 | 15.22 | 36.42 | н.о. | 100.07 | (Ru <sub>0.64</sub> Ir <sub>0.25</sub> Os <sub>0.11</sub> ) |                                                                                |
| Самородный осмий   |         |       |       |       |      |        |                                                             |                                                                                |
| 3                  | 14-117  | н.о.  | 80.14 | 19.34 | н.о. | 99.48  | (Os <sub>0.81</sub> Ir <sub>0.19</sub> )                    | Включение<br>в аваруите I                                                      |
| 4                  | 112-117 | н.о.  | 80.81 | 19.48 | н.о. | 100.29 | (Os <sub>0.81</sub> Ir <sub>0.19</sub> )                    | Включение<br>в пентлан-<br>дите                                                |
| 5                  | 112-171 | н.о.  | 54.13 | 45.49 | н.о. | 99.62  | (Os <sub>0.55</sub> Ir <sub>0.45</sub> )                    | Включение<br>в пентлан-<br>дите, ко-<br>бальтистом<br>пентладите,<br>вайрауите |
| 6                  | 112-175 | н.о.  | 51.33 | 48.34 | н.о. | 99.67  | (Os <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.48</sub> )                    |                                                                                |
| 7                  | 112-176 | н.о.  | 58.04 | 42.06 | н.о. | 100.10 | (Os <sub>0.58</sub> Ir <sub>0.42</sub> )                    |                                                                                |
| 8                  | 112-172 | н.о.  | 58.69 | 41.03 | н.о. | 99.72  | (Os <sub>0.59</sub> Ir <sub>0.41</sub> )                    |                                                                                |
| 9                  | 112-173 | н.о.  | 54.62 | 43.43 | 1.75 | 99.80  | (Os <sub>0.53</sub> Ir <sub>0.42</sub> Ni <sub>0.05</sub> ) |                                                                                |
| 10                 | 112-185 | н.о.  | 55.41 | 40.32 | 3.57 | 99.30  | (Os <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.37</sub> Ni <sub>0.11</sub> ) |                                                                                |
| 11                 | 112-186 | н.о.  | 51.91 | 43.66 | 3.65 | 99.22  | (Os <sub>0.49</sub> Ir <sub>0.40</sub> Ni <sub>0.11</sub> ) |                                                                                |
| 12                 | 112-188 | н.о.  | 55.02 | 43.77 | 1.32 | 100.10 | (Os <sub>0.54</sub> Ir <sub>0.42</sub> Ni <sub>0.04</sub> ) |                                                                                |
| 13                 | 112-189 | н.о.  | 52.91 | 45.21 | 1.33 | 99.45  | (Os <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.44</sub> Ni <sub>0.04</sub> ) |                                                                                |
| 14                 | 112-179 | н.о.  | 73.25 | 26.48 | н.о. | 99.73  | (Os <sub>0.74</sub> Ir <sub>0.26</sub> )                    |                                                                                |
| 15                 | 112-174 | н.о.  | 60.52 | 39.48 | н.о. | 100.00 | (Os <sub>0.61</sub> Ir <sub>0.39</sub> )                    |                                                                                |
| 16                 | 112-104 | н.о.  | 50.52 | 48.85 | н.о. | 99.37  | (Os <sub>0.51</sub> Ir <sub>0.49</sub> )                    |                                                                                |
| 17                 | 112-105 | н.о.  | 51.59 | 47.77 | н.о. | 99.36  | (Os <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.48</sub> )                    |                                                                                |
| 18                 | 112-106 | н.о.  | 51.28 | 47.44 | н.о. | 98.72  | (Os <sub>0.52</sub> Ir <sub>0.48</sub> )                    |                                                                                |
| 19                 | 112-112 | н.о.  | 59.01 | 41.11 | н.о. | 100.12 | (Os <sub>0.59</sub> Ir <sub>0.41</sub> )                    |                                                                                |
| 20                 | 112-113 | н.о.  | 58.09 | 41.42 | н.о. | 99.51  | (Os <sub>0.59</sub> Ir <sub>0.41</sub> )                    |                                                                                |
| 21                 | 112-114 | н.о.  | 61.21 | 36.62 | 1.48 | 99.31  | (Os <sub>0.60</sub> Ir <sub>0.35</sub> Ni <sub>0.05</sub> ) |                                                                                |
| 22                 | 112-122 | н.о.  | 50.53 | 49.64 | н.о. | 100.17 | (Os <sub>0.51</sub> Ir <sub>0.49</sub> )                    |                                                                                |
| 23                 | 112-126 | н.о.  | 50.30 | 48.45 | н.о. | 98.75  | (Os <sub>0.51</sub> Ir <sub>0.49</sub> )                    |                                                                                |
| 24                 | 112-129 | н.о.  | 57.20 | 41.41 | н.о. | 98.61  | (Os <sub>0.58</sub> Ir <sub>0.42</sub> )                    |                                                                                |
| 25                 | 112-130 | н.о.  | 57.88 | 41.64 | н.о. | 99.52  | (Os <sub>0.58</sub> Ir <sub>0.42</sub> )                    |                                                                                |
| 26                 | 112-120 | н.о.  | 48.36 | 51.62 | н.о. | 99.98  | (Ir <sub>0.51</sub> Os <sub>0.49</sub> )                    |                                                                                |
| 27                 | 112-125 | н.о.  | 44.54 | 54.29 | н.о. | 98.83  | (Ir <sub>0.55</sub> Os <sub>0.45</sub> )                    |                                                                                |

Примечание. Пределы обнаружения составили (мас. %): Ru — 0.27, Os — 0.19, Ir — 0.21, Ni — 0.16.

**Таблица 6.** Химический состав МПГ (мас. %) из пластически деформированных ультрамафитов  
**Table 6.** Chemical composition of PGM (wt %) from plastically deformed ultramafite

| №<br>п/п                   | Об-<br>ра-<br>зец | Ru   | Ir    | Rh   | Pt    | Pd   | Ni    | Co   | Fe    | Cu   | As  | Сум-<br>ма | Формула                                                                                              | Форма на-<br>хождения                                                                                                                      |
|----------------------------|-------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-----|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гарутиит (Ni,Fe,Ir)        |                   |      |       |      |       |      |       |      |       |      |     |            |                                                                                                      |                                                                                                                                            |
| 1                          | 14-46*            | н.о. | 53.89 | н.о. | н.о.  | н.о. | 21.33 | н.о. | 24.04 | н.о. | 0.0 | 99.26      | (Fe <sub>0.40</sub> Ni <sub>0.34</sub> Ir <sub>0.26</sub> )                                          | Микров-<br>ключения в<br>самородной<br>меди                                                                                                |
| 2                          | 14-47*            | н.о. | 47.02 | н.о. | н.о.  | н.о. | 27.54 | н.о. | 25.08 | н.о. | 0.0 | 99.64      | (Fe <sub>0.39</sub> Ni <sub>0.40</sub> Ir <sub>0.21</sub> )                                          |                                                                                                                                            |
| 3                          | 14-99             | 6.77 | 48.30 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.50 | 2.09 | 22.67 | н.о. | 0.0 | 99.33      | (Fe <sub>0.37</sub> Ni <sub>0.31</sub> Ir <sub>0.23</sub><br>Ru <sub>0.06</sub> Co <sub>0.03</sub> ) | Ксеноморф-<br>ные включе-<br>ния в тесной<br>ассоциации<br>с Ir—Pt-со-<br>державшим<br>аваруитом II<br>в основной<br>силикатной<br>матрице |
| 4                          | 14-100            | 3.69 | 49.22 | н.о. | н.о.  | н.о. | 20.96 | 1.57 | 23.85 | н.о. | 0.0 | 99.29      | (Fe <sub>0.39</sub> Ni <sub>0.33</sub> Ir <sub>0.23</sub><br>Ru <sub>0.03</sub> Co <sub>0.02</sub> ) |                                                                                                                                            |
| 5                          | 14-101            | 7.43 | 54.08 | н.о. | н.о.  | н.о. | 17.98 | 1.95 | 17.15 | н.о. | 0.0 | 98.59      | (Fe <sub>0.31</sub> Ni <sub>0.31</sub> Ir <sub>0.28</sub><br>Ru <sub>0.07</sub> Co <sub>0.03</sub> ) |                                                                                                                                            |
| 6                          | 14-114            | 2.24 | 49.36 | н.о. | н.о.  | н.о. | 23.35 | 1.39 | 22.80 | н.о. | 0.0 | 99.14      | (Fe <sub>0.37</sub> Ni <sub>0.36</sub> Ir <sub>0.23</sub><br>Ru <sub>0.02</sub> Co <sub>0.02</sub> ) |                                                                                                                                            |
| Тетраферроплатина PtFe     |                   |      |       |      |       |      |       |      |       |      |     |            |                                                                                                      |                                                                                                                                            |
| 7                          | 14-130            | н.о. | н.о.  | н.о. | 76.29 | н.о. | н.о.  | н.о. | 23.94 | н.о. | 0.0 | 100.23     | Pt <sub>0.95</sub> Fe <sub>1.05</sub>                                                                | Гипидио-<br>морфные<br>включения в<br>зернах ава-<br>руита II                                                                              |
| 8                          | 14-131            | н.о. | н.о.  | н.о. | 75.81 | н.о. | н.о.  | н.о. | 22.63 | н.о. | 0.0 | 98.44      | Pt <sub>0.98</sub> Fe <sub>1.02</sub>                                                                |                                                                                                                                            |
| 9                          | 14-134            | н.о. | н.о.  | н.о. | 79.54 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.73 | н.о. | 0.0 | 99.27      | Pt <sub>1.07</sub> Fe <sub>0.93</sub>                                                                |                                                                                                                                            |
| 10                         | 14-135            | н.о. | н.о.  | н.о. | 74.42 | н.о. | н.о.  | н.о. | 24.09 | н.о. | 0.0 | 99.51      | Pt <sub>0.94</sub> Fe <sub>1.06</sub>                                                                |                                                                                                                                            |
| 11                         | 14-136            | н.о. | н.о.  | н.о. | 77.30 | н.о. | н.о.  | н.о. | 22.49 | н.о. | 0.0 | 99.79      | Pt <sub>0.99</sub> Fe <sub>1.01</sub>                                                                |                                                                                                                                            |
| Неназванная фаза (Pt,Ir)Fe |                   |      |       |      |       |      |       |      |       |      |     |            |                                                                                                      |                                                                                                                                            |
| 12                         | 14-122            | н.о. | 13.53 | н.о. | 66.81 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.33 | н.о. | 0.0 | 99.67      | (Pt <sub>0.90</sub> Ir <sub>0.19</sub> ) <sub>1.09</sub><br>Fe <sub>0.91</sub>                       | Гипидио-<br>морфные<br>включения в<br>зернах ава-<br>руита II                                                                              |
| 13                         | 14-123            | н.о. | 11.66 | н.о. | 68.52 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.86 | н.о. | 0.0 | 100.04     | (Pt <sub>0.91</sub> Ir <sub>0.16</sub> ) <sub>1.07</sub><br>Fe <sub>0.93</sub>                       |                                                                                                                                            |
| 14                         | 14-125            | н.о. | 17.59 | н.о. | 60.41 | н.о. | н.о.  | н.о. | 21.54 | н.о. | 0.0 | 99.54      | (Pt <sub>0.79</sub> Ir <sub>0.23</sub> ) <sub>1.02</sub><br>Fe <sub>0.98</sub>                       |                                                                                                                                            |
| 15                         | 14-129            | н.о. | 9.52  | н.о. | 70.72 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.48 | н.о. | 0.0 | 99.72      | (Pt <sub>0.95</sub> Ir <sub>0.13</sub> ) <sub>1.08</sub><br>Fe <sub>0.92</sub>                       |                                                                                                                                            |
| 16                         | 14-132            | н.о. | 16.80 | н.о. | 62.85 | н.о. | н.о.  | н.о. | 19.69 | н.о. | 0.0 | 99.34      | (Pt <sub>0.85</sub> Ir <sub>0.23</sub> ) <sub>1.08</sub><br>Fe <sub>0.92</sub>                       |                                                                                                                                            |
| 17                         | 14-133            | н.о. | 13.36 | н.о. | 66.12 | н.о. | н.о.  | н.о. | 20.63 | н.о. | 0.0 | 100.11     | (Pt <sub>0.87</sub> Ir <sub>0.18</sub> ) <sub>1.05</sub><br>Fe <sub>0.95</sub>                       |                                                                                                                                            |

| №<br>п/п                                         | Об-<br>ра-<br>зец | Ru   | Ir   | Rh    | Pt    | Pd    | Ni    | Co   | Fe    | Cu    | As    | Сум-<br>ма | Формула                                                                                                           | Форма на-<br>хождения                                                        |
|--------------------------------------------------|-------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Неназванная фаза (Ni,Cu,Pd,Pt) <sub>2-3</sub> Fe |                   |      |      |       |       |       |       |      |       |       |       |            |                                                                                                                   |                                                                              |
| 18                                               | 142-37            | н.о. | н.о. | н.о.  | 13.60 | 10.44 | 21.72 | н.о. | 20.02 | 33.84 | 0.0   | 99.61      | (Cu <sub>1.49</sub> Ni <sub>1.04</sub> Pd <sub>0.27</sub> Pt <sub>0.20</sub> ) <sub>3.0</sub> Fe <sub>1.00</sub>  | Самосто-<br>ятельные<br>гипидиомор-<br>фные зерна в<br>силикатной<br>матрице |
| 19                                               | 142-38            | н.о. | н.о. | н.о.  | 6.68  | 1.96  | 56.60 | н.о. | 29.00 | 4.65  | 0.0   | 98.90      | (Ni <sub>1.80</sub> Cu <sub>0.14</sub> Pt <sub>0.06</sub> Pd <sub>0.03</sub> ) <sub>2.03</sub> Fe <sub>0.97</sub> |                                                                              |
| 20                                               | 142-39            | н.о. | н.о. | н.о.  | 5.71  | 11.52 | 33.68 | н.о. | 25.49 | 22.48 | 0.0   | 98.89      | (Ni <sub>1.32</sub> Cu <sub>0.81</sub> Pd <sub>0.25</sub> Pt <sub>0.07</sub> ) <sub>2.45</sub> Fe <sub>1.05</sub> |                                                                              |
| 21                                               | 142-42            | н.о. | н.о. | н.о.  | 5.45  | 1.60  | 57.16 | н.о. | 31.06 | 4.53  | 0.0   | 99.80      | (Ni <sub>1.78</sub> Cu <sub>0.13</sub> Pt <sub>0.05</sub> Pd <sub>0.03</sub> ) <sub>1.99</sub> Fe <sub>1.01</sub> |                                                                              |
| 22                                               | 142-43            | н.о. | н.о. | н.о.  | 5.19  | 10.25 | 31.81 | н.о. | 22.08 | 30.72 | 0.0   | 100.05     | (Ni <sub>1.41</sub> Cu <sub>1.25</sub> Pd <sub>0.25</sub> Pt <sub>0.07</sub> ) <sub>2.98</sub> Fe <sub>1.02</sub> |                                                                              |
| Заккариниит (RhNiAs)                             |                   |      |      |       |       |       |       |      |       |       |       |            |                                                                                                                   |                                                                              |
| 23                                               | 160-57            | 8.33 | н.о. | 36.64 | н.о.  | н.о.  | 21.35 | 0.49 | н.о.  | н.о.  | 33.26 | 100.07     | (Rh <sub>0.29</sub> Ni <sub>0.29</sub> Ru <sub>0.07</sub> As <sub>0.35</sub> )                                    | Гипидио-<br>морфные<br>краевые<br>обособления<br>в зернах<br>аваруита II     |
| 24                                               | 160-58            | 4.30 | н.о. | 37.28 | н.о.  | н.о.  | 17.98 | н.о. | н.о.  | н.о.  | 39.36 | 98.92      | (Rh <sub>0.29</sub> Ni <sub>0.25</sub> Ru <sub>0.03</sub> As <sub>0.43</sub> )                                    |                                                                              |

Примечание. \* — в связи с малыми размерами включений идентификация фазы выполнена на основе суммарного химического состава изучаемого минерала и вмещающей его самородной меди путем исключения из состава содержаний меди, никеля и железа, характерных для собственно самородной меди: Cu 94.5 мас. %, Ni 2.6 мас. %, Fe 1.7 мас. %. Пределы обнаружения составили (мас. %): Ru — 0.10, Ir — 0.45, Rh — 0.11, Pt — 0.18, Pd — 0.13, Ni — 0.14, Co — 0.12, Fe — 0.12, Cu — 0.13, As — 0.14.

(до 10.0 мас. %), был обнаружен в шлиховых пробах бассейна р. Анабар (Айриянц и др., 2014). Отмечено, что включения тетраферроплатины и фазы (Pt,Ir)Fe не встречаются вместе в составе одного зерна аваруита.

Неназванная фаза (Ni,Cu,Pd,Pt)<sub>2-3</sub>Fe обнаружена в силикатной матрице вблизи выделения серпентинизированного оливина в виде самостоятельных гипидиоморфных зерен размером до 5 мкм (рис. 6, д). Ее формула близка аваруиту, но отличается наличием в катионной группе, наряду с никелем, меди (до 33.8 мас. %), платины (до 13.6 мас. %) и палладия (до 11.5 мас. %) (табл. 6).

Заккариниит редок, наблюдается в виде гипидиоморфных краевых обособлений размером до 2 мкм в ксеноморфных и комковидных зернах Ru—Rh-содержащего аваруита. Здесь же в ассоциации с ним отмечаются арсениды никеля (Ni<sub>2</sub>S, NiAs) (рис. 6, е). В химическом составе закариниита диагностируются примеси рутения (до 8.3 мас. %) и кобальта (до 0.5 мас. %) (табл. 6).

**Сульфиды ЭПГ.** Распространены более ограниченно по сравнению с первой группой. Их состав отвечает формулам Me<sub>2</sub>S и MeS<sub>2</sub>.

Сульфиды с формулой Me<sub>2</sub>S подразделяются на две подгруппы. В первой подгруппе в катионном ряду помимо Ru—Os—Ir-триады в значительных количествах присутствует никель (до 27.6 мас. %) и железо (до 37.4 мас. %), а также диагностируется примесь кобальта (до 2.0 %) (табл. 7). Такие сульфиды отмечаются в виде губчатых гипидиоморфных включений размером до 3 мкм в ассоциации с купропентландитом и вайрауитом либо наблюдаются в виде неправильных ксеноморфных включений,

**Таблица 7.** Химический состав сульфидов ЭПГ (мас. %) из пластически деформированных гарцбургитов

**Table 7.** Chemical composition of sulphides of PGE (wt %) from plastically deformed harzburgite

| № п/п                    | Об-разец  | Ru   | Os    | Ir    | Re    | Ni    | Co   | Fe    | S     | Сум-ма | Формула                                                                                                                             | Форма нахождения                                                  |
|--------------------------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Me <sub>2</sub> S        |           |      |       |       |       |       |      |       |       |        |                                                                                                                                     |                                                                   |
| 1                        | 14-108    | 8.67 | н.о.  | 3.09  | н.о.  | 27.60 | 1.78 | 35.89 | 20.95 | 99.99  | (Fe <sub>0.98</sub> Ni <sub>0.72</sub> Ru <sub>0.13</sub> Ir <sub>0.03</sub> Co <sub>0.05</sub> ) <sub>1.91</sub> S <sub>1.09</sub> | Реакционная «рубашка» (каймы) вокруг зерен гарцунгита             |
| 2                        | 14-109    | 9.28 | н.о.  | 9.37  | н.о.  | 21.97 | 1.95 | 37.39 | 19.91 | 99.87  | (Fe <sub>1.08</sub> Ni <sub>0.60</sub> Ru <sub>0.15</sub> Ir <sub>0.08</sub> Co <sub>0.05</sub> ) <sub>1.96</sub> S <sub>1.04</sub> |                                                                   |
| 3                        | 14-53     | н.о. | 28.50 | 13.38 | н.о.  | 17.94 | н.о. | 24.00 | 16.07 | 99.89  | (Fe <sub>0.86</sub> Ni <sub>0.61</sub> Os <sub>0.30</sub> Ir <sub>0.14</sub> ) <sub>1.91</sub> S <sub>1.09</sub>                    | Губчатые включения в ассоциации с купропентландитом и вайраунитом |
| 4                        | 14-55     | н.о. | 28.87 | 12.06 | н.о.  | 18.68 | н.о. | 24.87 | 15.01 | 99.48  | (Fe <sub>0.95</sub> Ni <sub>0.68</sub> Os <sub>0.32</sub> Ir <sub>0.13</sub> ) <sub>2.08</sub> S <sub>0.92</sub>                    |                                                                   |
| 5                        | 123-53    | н.о. | 39.72 | 37.70 | 8.68  | 5.75  | н.о. | н.о.  | 8.91  | 100.76 | (Os <sub>0.75</sub> Ir <sub>0.71</sub> Ni <sub>0.35</sub> Re <sub>0.17</sub> ) <sub>1.98</sub> S <sub>1.02</sub>                    | Включения, капсулированные в зерна кобальтистого пентландита      |
| 6                        | 123-54    | н.о. | 36.95 | 38.56 | 10.01 | 5.15  | н.о. | н.о.  | 8.23  | 98.90  | (Ir <sub>0.78</sub> Os <sub>0.76</sub> Ni <sub>0.34</sub> Re <sub>0.21</sub> ) <sub>2.09</sub> S <sub>0.91</sub>                    |                                                                   |
| 7                        | 142-217   | н.о. | 80.61 | 8.03  | н.о.  | н.о.  | н.о. | 3.41  | 8.79  | 100.85 | (Os <sub>1.55</sub> Ir <sub>0.15</sub> Fe <sub>0.22</sub> ) <sub>1.92</sub> S <sub>1.08</sub>                                       |                                                                   |
| 8                        | 142-223   | н.о. | 78.85 | 8.03  | н.о.  | н.о.  | н.о. | 4.66  | 9.00  | 100.54 | (Os <sub>1.48</sub> Ir <sub>0.15</sub> Fe <sub>0.30</sub> ) <sub>1.93</sub> S <sub>1.07</sub>                                       |                                                                   |
| 9                        | 142-221   | н.о. | 77.74 | 7.42  | н.о.  | н.о.  | н.о. | 5.31  | 8.70  | 99.18  | (Os <sub>1.51</sub> Ir <sub>0.14</sub> Fe <sub>0.35</sub> ) <sub>2.00</sub> S <sub>1.00</sub>                                       |                                                                   |
| Ir-содержащий эрликманит |           |      |       |       |       |       |      |       |       |        |                                                                                                                                     |                                                                   |
| 10                       | 112-159/1 | н.о. | 38.35 | 35.53 | н.о.  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 25.45 | 99.33  | (Os <sub>0.51</sub> Ir <sub>0.47</sub> ) <sub>0.98</sub> S <sub>2.02</sub>                                                          | Включения в зерна пентландита                                     |
| 11                       | 112-168/1 | н.о. | 45.51 | 28.83 | н.о.  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 25.38 | 99.72  | (Os <sub>0.60</sub> Ir <sub>0.38</sub> ) <sub>0.98</sub> S <sub>2.02</sub>                                                          |                                                                   |
| 12                       | 14-116    | н.о. | 65.42 | 10.77 | н.о.  | н.о.  | н.о. | н.о.  | 23.28 | 99.47  | (Os <sub>0.95</sub> Ir <sub>0.15</sub> ) <sub>1.10</sub> S <sub>1.90</sub>                                                          | Включения в зернах аварунита I                                    |

Примечание. Пределы обнаружения (мас. %): Ru — 0.19, Os — 0.15, Ir — 0.43, Re — 0.33, Ni — 0.17, Co — 0.12, Fe — 0.17, S — 0.10.

очевидно являющихся продуктом замещения гарутиита (рис. 6, а, в). Во второй подгруппе катионный ряд преимущественно представлен осмием и иридием (75–90 мас. %) при непостоянном присутствии примеси рения (до 10.0 мас. %), никеля (до 5.8 мас. %) и железа (до 5.3 мас. %). Сульфиды данной подгруппы отмечаются в виде гипидиоморфных включений с размером до 2 мкм, капсулированных в зернах кобальтистого пентландита (рис. 5, г).

**Рис. 5.** Микрофотографии МТР и сульфидов Os–Ir в вайрауите и пентландите из пластически деформированных гарцбургитов. Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов. Vair — вайрауит (CoFe), Co-Pn — кобальтистый пентландит ((Fe,Ni,Co)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>), CrSp — хромшпинель, Chl — хлорит. **Fig. 5.** Microphotographs of Os–Ir metallic solid solutions and Os–Ir sulfides in wairauites and pentlandites from plastically deformed harzburgites of the Idzhim massif. BSE images. Vair — wairauite (CoFe), Co-Pn — cobalt pentlandite (Fe,Ni,Co)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>, CrSp — chrome spinel, Chl — chlorite.



Сульфиды с формулой  $\text{MeS}_2$  обнаруживаются значительно реже. Размер отдельных зерен не превышает 1 мкм. Они характеризуются повышенной степенью идиоморфизма с хорошо выраженными гранями и наблюдаются в зернах пентландита и аваруита, находящихся в непосредственном контакте. По химическому составу ближе всего соответствуют Ir-содержащему эрликманиту ( $\text{Os, IrS}_2$ ). Включения сульфидов в пентландите содержат больше иридия, чем в аваруите (табл. 7).

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мантийные перидотиты различных офиолитовых комплексов мира до настоящего времени остаются одним из объектов активного изучения на предмет содержания ЭПГ, которые практически всегда в них диагностируются. При этом большая часть исследований сфокусирована на изучении хромититов, где ЭПГ в основном встречаются как редкие акцессорные МПГ, тогда как сами реститовые ультрамафиты, вмещающие хромитовое оруденение, значительно реже становятся объектом исследования.

В последние десятилетия накопилось немало работ по минералогии ЭПГ во вмещающих ультрамафитах из различных офиолитовых комплексов (Prichard et al., 1994; Zhou et al., 2001; Luguët et al., 2007; Ferraris, Lorand, 2015; Савельев, Философова, 2017; Савельев, Гатауллин, 2023, и др.). Отмечено, что самые высокие ( $> 1$  ppm) содержания ЭПГ в реститовых ультрамафитах часто связаны с присутствием интерстициальных акцессорных сульфидов основных металлов в последних (Leblanc, 1991; Luguët, Reisberg, 2016).

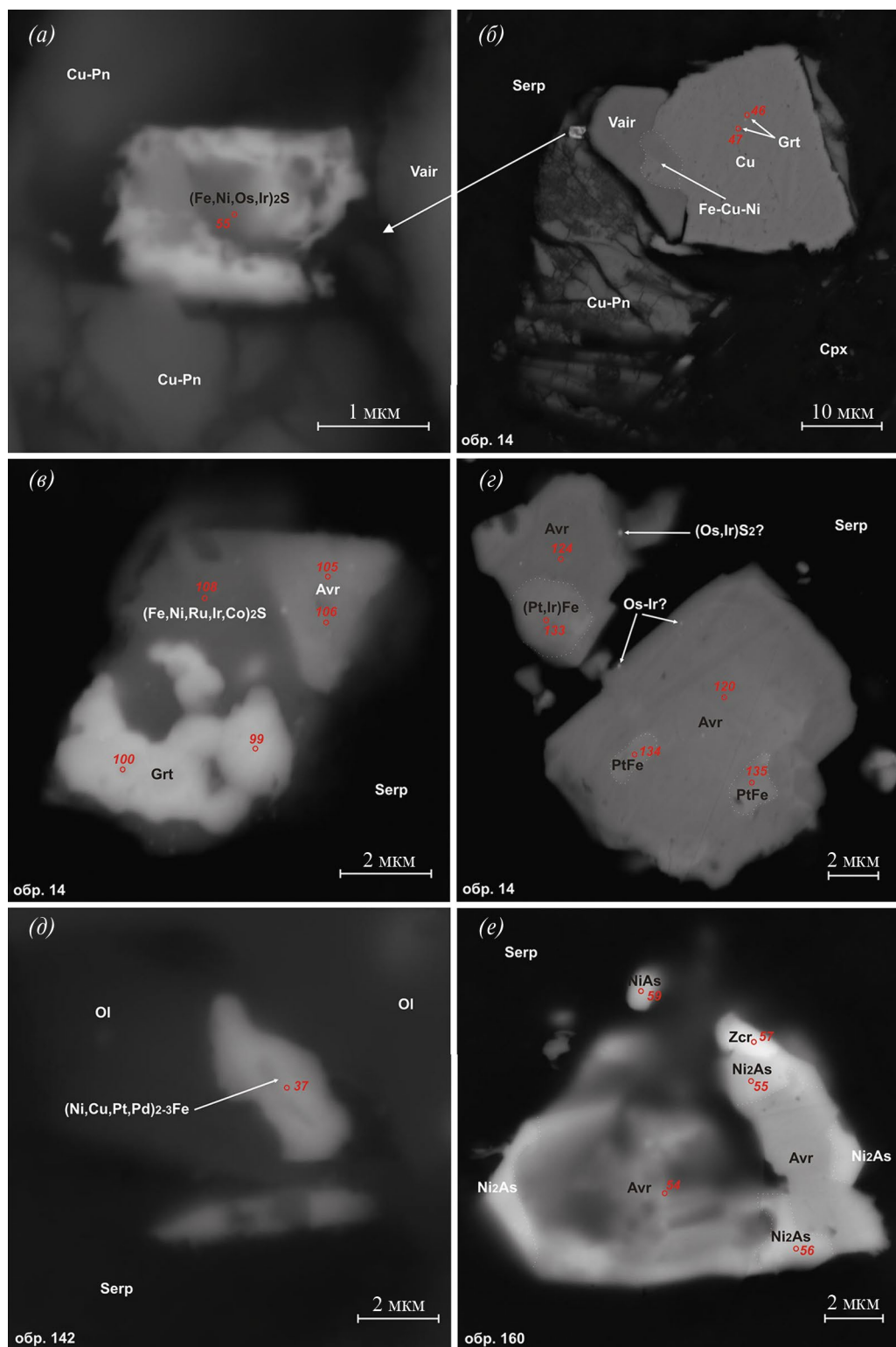
Проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что большая часть ЭПГ в изученных гарцбургитах входит в состав пентландита и аваруита. В дунитах минералами с повышенным содержанием ЭПГ выступают только арсениды никеля. В составе указанных минералов отмечаются примеси Ir, Os, Pt, Ru и Rh. Палладий в число примесей не входит. Это наблюдение подтверждает ранее сделанный вывод о проявлении данным металлом наиболее выраженной антипатии к другим ЭПГ и его способности более легко мобилизоваться в процессе частичного плавления мантийного вещества (Daltry, Wilson, 1997).

Экспериментальные исследования растворимости ЭПГ в сульфидах показали, что они обладают значительной емкостью по изоморфному накоплению большинства из платиноидов (Малевский и др., 1977; Дистлер и др., 1988; Daltry, Wilson, 1997). Согласно данным исследованиям, максимальная растворимость ЭПГ может достигать (мас. %): в пентландите — Os — 0.66, Ir — 7.5, Ru — 11.86, Pt — 1.9, Rh — 14.1, Pd — 3.3; в аваруите — Ir — 27.0, Ru — 0.9, Pt — 47.1, Rh — 0.5, Pd — 7.0.

Акцессорный пентландит, содержащий примеси Os или Os и Ir, а также микровключения самородного осмия, Ir-содержащего осмия и эрликманита, очевидно, относится к наиболее ранним образованиям, кристаллизовавшимся из тугоплавкого моносulfидного твердого раствора (mss) в процессе частичного плавления верхней мантии (Малич и др., 2016; Мурзин и др., 2023). Моносulfидный твердый раствор (mss) наряду с сульфидами, богатыми медью, как полагают ряд исследователей, контролируют основную часть ЭПГ верхней мантии (Alard et al., 2000; Fonseca et al., 2012). Совместимость и связь элементов Ir-группы (Os, Ir, и Ru) с тугоплавкими сульфидными фазами и сплавами в процессе частичного плавления общеизвестна и обусловлена их химическими особенностями (Barnes et al., 1985; Fonseca et al., 2012).

**Рис. 6.** Акцессорные МПГ в пластически деформированных гарцбургитах и дунитах. Микрофотографии в режиме обратно-рассеянных электронов. Grt — гарутиит (Ni, Fe, Ir), Zcr — закариниит (RhNiAs), Cu-Pn — купропентландит ( $\text{CuFe}_5\text{Ni}_3\text{S}_8$ ).

**Fig. 6.** Accessory PGE in plastically deformed harzburgites and dunites. BSE images. Grt — garutite (Ni, Fe, Ir), Zcr — zaccarinite (RhNiAs), Cu-Pn — cupropentlandite ( $\text{CuFe}_5\text{Ni}_3\text{S}_8$ ).



Выявленный ЭПГ-содержащий аваруит нами разделен на две генерации: 1) раннюю — зерна с высокой степенью идиоморфизма, находящиеся в непосредственном контакте с зернами пентландита, содержащие только примесь Os; 2) позднюю (вторичную) — ксеноморфные и комковидные зерна в хлорит-серпентиновом цементе, содержащие четыре набора примесей: Ir–Ru–Rh, Ru–Rh, Pt–Ir и Pt. Образование аваруита первой генерации связано с процессом замещения пентландита на заключительной стадии магматического процесса. Такой вывод находит подтверждение в обнаруженном наборе ЭПГ, а также в экспериментальных исследованиях — при нагреве в восстановительной обстановке во всех газовых средах в диапазоне температур 800–950°C одним из продуктов восстановления пентландита является ферроникелевый сплав (Ерцева и др., 1997). При этом из особенностей химического состава минералов и включений вытекает, что в процессе замещения пентландита аваруитом происходил вынос иридия (табл. 4, 5, 7).

Аваруит второй генерации связан с процессами автометаморфической серпентинизации и преобразования никельсодержащих силикатов, прежде всего оливина, а также хромшпинелидов при температурах 300–500°C в восстановительных условиях (Новаков и др., 2014). При этом аваруит второй генерации, в отличие от аваруита первой генерации, «насыщался» Ir, Ru, Rh и Pt, вероятно выносимых из хромшпинелидов. Здесь же, очевидно, одновременно с аваруитом второй генерации (либо близко по времени) происходило формирование гарутиита, о чем свидетельствует тесная ассоциация этих минералов.

Обособление самородного осмия, Ir-содержащего осмия, тетраферроплатины и неназванной минеральной фазы (Pt,Ir)Fe в виде более крупных дискретных фаз (микровключений) авторы связывают с субсолидным перераспределением ЭПГ при остывании и серпентинизации. Данный вывод находит подтверждение в более ранних работах (Edwards, 1990; Ohnenstetter, 1992; Prichard et al., 1994; Luguët et al., 2004; Lorand, Luguët, 2016).

Для самородного рутения, редко отмечаемого в виде губчатых, преимущественно дезинтегрированных на ряд сегментов включений в зернах аваруита, предполагается вторичное происхождение, обусловленное растворением и переотложением первичных Os–Ir–Ru твердых растворов, на что указывают: (1) тесная ассоциация самородного рутения с аваруитом второй генерации, другими низкотемпературными минералами ЭПГ и с зонами изменения (хлорит-серпентинитовым агрегатом), (2) губчатая структура, которая относится к числу вторичных (Киселева и др., 2014; Толстых, 2018; Malitch et al., 2001).

Преобразование пентландита в кобальтистый пентландит на стадии автометаморфической серпентинизации сопровождалось субсолидным перераспределением ЭПГ с формированием однородной вкрапленности субмикронных включений Ir-содержащего осмия («пудинговая» структура), а также замещением Ir-содержащего эрликманита более поздними сульфидами состава (Os,Ir,Me)<sub>2</sub>S, где в катионном ряду помимо основных осмия и иридия отмечаются рений, никель и железо. В результате этих же процессов зерна кобальтистого пентландита по краям замещались вайрауитом с обособлением более крупных включений Ir-содержащего осмия.

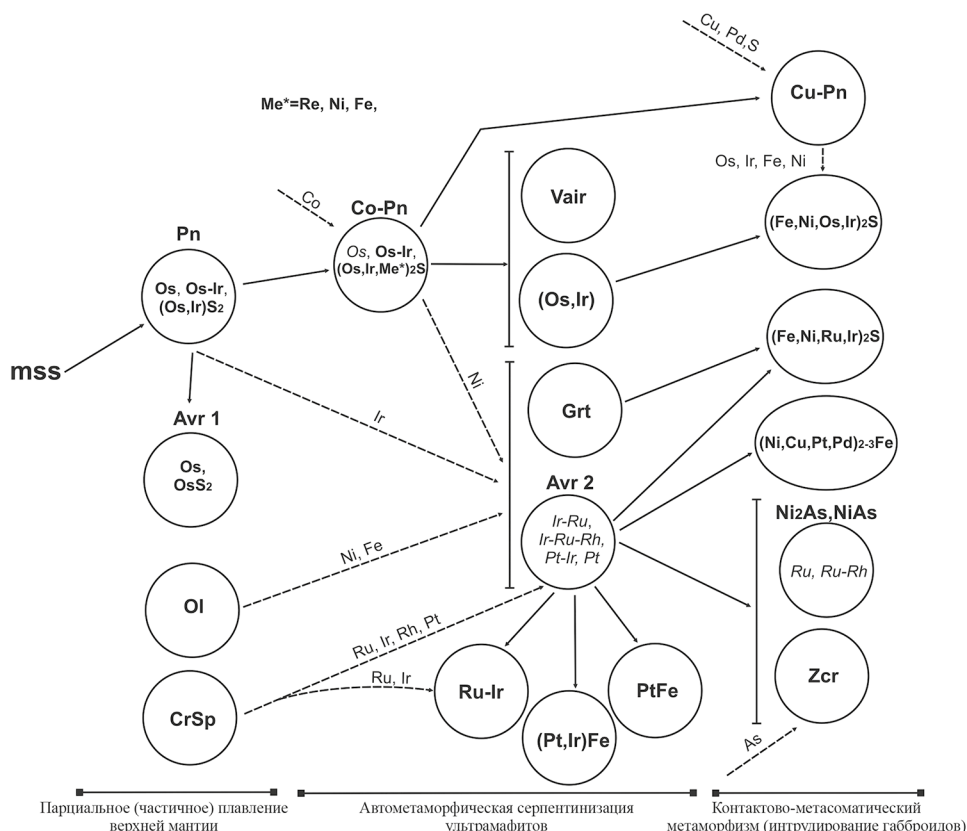
Формирование купропентландита без включений ЭПГ, арсенидов никеля с включениями самородных Ru и Rh, неназванной фазы (Ni,Cu,Pd,Pt)<sub>2-3</sub>Fe, закариниита и поздних сульфидов (Fe,Ni,Os,Ir)<sub>2</sub>S и (Fe,Ni,Ru,Ir)<sub>2</sub>S авторы связывают с контактово-метасоматическими изменениями, произошедшими в процессе интродуирования в ультрамафитовое тело близких по возрасту габброидов (Леснов и др., 2019). Этот процесс сопровождался привнесом из габброидов Cu, Pd, S и As, что подтверждается наличием в габброидах пирит-халькопиритовой минерализации, а также находками

самородного золота, арсенидов Pt и Pd в шлиховых пробах водотоков, эродирующих тела габброидов (Семенов и др., 2019; Сибилев, 1980).

Таким образом, формирование наблюдаемой акцессорной минерализации МПГ происходило в три этапа: 1) при частичном плавлении верхней мантии, 2) в процессе серпентинизации и 3) при контактово-метасоматических изменениях, сопровождавших внедрения интрузивов основного состава (рис. 7).

## ВЫВОДЫ

1. В пентландите, аваруите и арсенидах никеля ( $\text{NiS}$ ,  $\text{Ni}_2\text{S}$ ) из пластически деформированных гарцбургитов и дунитов Иджимского мафит-ультрамафитового массива впервые обнаружены тонкодисперсные включения МПГ. В указанных минералах, а также в силикатной матрице идентифицированы самородный осмий, Ir-содержащий осмий, самородный рутений, гарутиит, тетраферроплатина, неназванные фазы  $(\text{Pt}, \text{Ir})\text{Fe}$  и  $(\text{Ni}, \text{Cu}, \text{Pd}, \text{Pt})_{2-3}\text{Fe}$ , закариниит, Ir-содержащий эрликманит и неназванные сульфиды с формулой  $\text{Me}_2\text{S}$ , где в катионной группе наряду с элементами Ir-группы присутствуют Ni, Fe и Co. В акцессорных хромшпинелидах примесей ЭПГ и включений МПГ не обнаружено.



**Рис. 7.** Схема образования (преобразования) изученных МПГ. Жирным шрифтом в кружках показаны выявленные минералы; курсивом в кружках — примеси ЭПГ в минералах.

**Fig. 7.** Scheme of the formation of PGM. Bold font in circles shows identified minerals; italics in circles indicate minor PGE in minerals.

2. Распределение ЭПГ в реститовых ультрамафитах контролируется частичным плавлением первичного перидотитового субстрата. Предполагается, что ЭПГ первоначально концентрировались на уровне первых ppm в штейновой фазе в области мантийного источника. В ходе частичного плавления извлечение серы из элементов Pt-группы (Pt, Pd, Rh) в силикатный расплав приводило к снижению фугитивности  $S_2$  и накоплению элементов Ir-группы (Os, Ir, Ru) в тугоплавком моносulfидном твердом растворе (mss), из которого в последующем кристаллизовался первичный Os-Ir-содержащий пентландит. Последующие преобразования этого sulfида в условиях восстановительной среды, при аутометаморфической серпентинизации и контактово-метасоматических изменениях, связанных с внедрением в ультрамафиты габброидов, привела к появлению ЭПГ-содержащих аваруита и арсенидов никеля, а также ко всему обнаруженному многообразию наблюдаемых МПГ. Обособление самородного осмия, Ir-содержащего осмия, тетраферроплатины и неназванной минеральной фазы (Pt,Ir)Fe в виде более крупных дискретных фаз (микровключений) авторы связывают с субсолидным перераспределением при остывании и воздействии процессов серпентинизации.

3. Проведенные исследования наряду с ранее полученными результатами по изучению ультрамафитов из офиолитовых поясов других регионов (Prichard et al., 1994; Макеев, Брянчанинова, 1999; Zhou et al., 2001; Lugué et al., 2007; Ferraris, Lorand, 2015; Савельев, Философова, 2017) показывают, что акцессорные первичные sulfиды (преимущественно — пентландит) и аваруит могут являться одними из главных концентраторов ЭПГ в реститовых ультрамафитах. Приуроченность микровключений платиноидов к акцессорному пентландиту подчеркивает их первичное мантийное происхождение, сингенетичное с подобными включениями в хромшпинелидах хромититов. Микровключения в аваруите и самородной меди, вероятно, связаны с преобразованиями первичных железо-никелевых sulfидов, содержавших ЭПГ.

Авторы выражают благодарность рецензентам за сделанные замечания, которые позволили улучшить статью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айриянц Е.В., Жмодик С.М., Иванов П.О., Белянин Д.К., Агафонов Л.В. Минеральные включения в железо-платиновых твердых растворах из россыпей проявлений бассейна р. Анабар // Геология и геофизика. **2014**. Т. 55. № 8. С. 1194—1210.

Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Том. ун-та, **1989**. 404 с.

Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л., Служеникин С.Ф., Филимонова А.А., Дюжиков О.А., Лапутина И.П. Петрология sulfидного магматического рудообразования. М.: Наука, **1988**. 232 с.

Добрецов Н.Л., Пономарева Л.Г. Офиолиты и ассоциирующие глаукофановые сланцы Куртушибинского хребта // Геология и геофизика. **1976**. № 2. С. 40—53.

Ерцева Л.Н., Дьяченко В.Т., Сухарев С.В. Восстановительная термообработка пентландита из пирротинсодержащего медно-никелевого sulfидного сырья // Цветные металлы. **1997**. № 6. С. 24—26.

Киселева О.Н., Жмодик С.М., Дамдинов Б.Б., Агафонов Л.В., Белянин Д.К. Состав и эволюция платинометалльной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян) // Геология и геофизика. **2014**. Т. 55. № 2. С. 333—349.

Леснов Ф.П. Петрохимия полигенных базит-гипербазитовых плутонов складчатых областей. Новосибирск: Наука, **1986**. 136 с.

Леснов Ф.П., Монгуш А.А., Ойдул Ч.К., Попов В.А. Структурно-генетические взаимоотношения ультрамафитов и габброидов в Куртушибинской офиолитовой ассоциации (Западный Саян) // Ультрамафит-мафитовые комплексы складчатых областей докембрия. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, **2005**. С. 59—61.

Леснов Ф.П., Кузугет К.С., Монгуш А.А., Ойдул Ч.К. Геология, петрология и рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов Республики Тыва. Новосибирск: Гео, **2019**. 350 с.

Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. СПб.: Наука, **1999**. 252 с.

- Малеvский А.Ю., Лапутина И.П., Дистлер В.В. Поведение платиновых металлов при кристаллизации пирротина из сульфидного расплава // Геохимия. **1977.** № 10. С. 1534–1542.
- Малич К.Н., Аникина Е.В. Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Пушкарев Е.В., Хиллер В.В. Вещественный состав и осмиевая изотопия первичных и вторичных ассоциаций минералов платиновой группы магнезиальных хромитов Нуралинского лерцолитового массива (Южный Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. **2016.** Т. 58. № 1. С. 3–22.
- Мурзин В.В., Малич К.Н., Баданина И.Ю., Варламов Д.А., Чашухин И.С. Минеральные ассоциации хромитов Алапаевского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал) // Литосфера. **2023.** Т. 23. № 5. С. 740–765.
- Новаков Р.М., Москалева С.В., Иванов В.В., Паламарь С.В. Пентландиты и аваруиты гипербазитового массива горы Солдатской (п-ов Камчатский мыс, Восточная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. **2014.** № 2. С. 137–146.
- Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. **1949.** Вып. 103. С. 1–91.
- Пинус Г.В., Велинский В.В., Леснов Ф.П., Банников О.Л., Агафонов Л.В. Альпинотипные гипербазиты Анадырско-Корякской складчатой системы. Новосибирск: Наука, **1973.** 320 с.
- Савельев Д.П., Гатауллин Р.А. Акцессорная платиноидная минерализация в лерцолитах массива Северный Крак (Южный Урал) // Георесурсы. **2023.** Т. 25. № 3. С. 208–215.
- Савельев Д.П., Филоsofova Т.М. Микровключения минералов элементов платиновой группы и золота в породах офиолитового комплекса п-ова Камчатский мыс // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. **2017.** № 2 (34). С. 5–13.
- Семенов М.И., Зорина А.Н., Коляшкин В.М., Качевский Л.К., Кротова Т.А., Александровский Ю.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Саянская. Лист N-46-XXXIV (Туран). Объяснительная записка / Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ», АО «Сибирское ПГО». СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, **2019.** 188 с.
- Сибилев А.К. Петрология и асбестонность офиолитов (на примере Иджимского массива в Западном Саяне). Новосибирск: Наука, **1980.** 216 с.
- Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. Минералогия и генезис ультрабазитов Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян) // Минералогия. **2022.** Т. 8. № 2. С. 49–62.
- Соболев В.С., Добрецов Н.Л. Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна). Новосибирск: Наука, **1977.** 222 с.
- Толстых Н.Д. Платиновая минерализация массивов Кондер и Инагли // Геосферные исследования. **2018.** № 1. С. 17–32.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И. Платиноносность хромитов Куртушибинского офиолитового пояса, Западный Саян: новые данные // ЗРМО. **2019.** Ч. 148. № 5. С. 113–125.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбояк Е.В. Первые находки минералов платиновой группы в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян) // ЗРМО. **2021.** Ч. 150. № 4. С. 77–91.

## First Findings of Platinum Group Minerals from Ultramafites of the Idzhim Mafic-Ultramafic Massif (Western Sayan)

A. N. Yurichev<sup>a,\*</sup>, A. I. Chernyshov<sup>a</sup>, E. V. Korbovyak<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

\*e-mail: juratur@sibmail.com

In plastically deformed harzburgite and dunite of the Idzhim mafic-ultramafic massif, which is part of the Kurtushiba ophiolite belt of the Western Sayan and is one of largest massifs of this belt, platinum group minerals (PGM) were identified for the first time. They were found in pentlandite, awaruite and nickel arsenides (NiS, Ni<sub>2</sub>S) in form of finely dispersed inclusions, the diagnosis of which, due to their small size, was carried out only qualitatively. Native osmium, Ir-bearing osmium, native ruthenium, garutiite, tetraferroplatinum, unnamed (Pt, Ir) Fe and (Ni, Cu, Pd, Pt)<sub>2-3</sub>Fe phases, zaccarinite, Ir-bearing erlikmanite and unnamed sulfides with crystal chemical formula Me<sub>2</sub>S were quantitatively identified and characterized. All PGM grains found are predominantly localized either in peripheral parts of grains of sulfides, awaruite and wairauite, or in silicate matrix in immediate vicinity of these minerals. The platinum

group elements (PGE) content and their distribution in restite ultramafic rocks was apparently controlled by partial melting of primary peridotite substrate. During partial melting, the extraction of sulfur and Pt-group platinoids (Pt, Pd, Rh) into the silicate melt led to a decrease in  $S_2$  fugacity and the accumulation of Ir-group platinoids (Os, Ir, Ru) in monosulfide solid solution (mss), from which subsequently primary Os-Ir-bearing pentlandite crystallized. The subsequent transformation of this sulfide led to appearance of PGE-containing awaruite and nickel arsenides, as well as to everything discovered diversity of identified PGM.

**Keywords:** Western Sayan, Kurtushiba ophiolite belt, Idzhim massif, ultramafites, platinum group elements, platinum group minerals

## REFERENCES

- Alard O., Griffin W.L., Lorand J.P., Jackson S., O'Reilly S.Y. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides. *Nature*. **2000**. Vol. 407. P. 891–894.
- Airiya E.V., Zhmodik S.M., Belyanin D.K., Agafonov L.V., Ivanov P.O. Mineral inclusions in Fe–Pt solid solution from the alluvial ore occurrences of the Anabar basin (Northeastern Siberian platform). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 8. P. 945–958.
- Barnes S.J., Naldrett A.J., Gorton M.P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.* **1985**. Vol. 53. P. 303–323.
- Dalry V.D.C., Wilson A.H. Review of platinum-group mineralogy: compositions and elemental associations of the PG-minerals and unidentified PGE-phases. *Miner. Petrol.* **1997**. Vol. 60. P. 185–229.
- Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L., Sluzhenikin S.F., Filimonova A.A., Dyuzhikov O.A., Laputina I.P. Petrology of sulfide igneous ore formation. Moscow: Nauka, **1988**. 232 p. (in Russian).
- Dobretsov N.L., Ponomareva L.G. Ophiolites and associated glaucophane schists of the Kurtushiba Range. *Geol. Geophys.* **1976**. N. 2. P. 40–53 (in Russian).
- Edwards S. Harzburgites and refractory melts in the Lewis Hills massif, Bay of Islands ophiolite complex: the base-metals and precious-metals story. *Canad. Miner.* **1990**. Vol. 28. P. 537–552.
- Ertseva L.N., Dyachenko V.T., Sukharev S.V. Restorative heat treatment of pentlandite from pyrrhotite-containing copper-nickel sulfide raw materials. *Non-ferrous metals*. **1997**. N. 6. P. 24–26 (in Russian).
- Ferraris C., Lorand J.P. Novodneprite (AuPb<sub>3</sub>), anyuïte [Au(Pb, Sb)<sub>2</sub>] and gold micro- and nano-inclusions within plastically deformed mantle-derived olivine from the Lherz peridotite (Pyrenees, France): a HRTEM–AEM–EELS study. *Phys. Chem. Miner.* **2015**. Vol. 42. P. 143–150.
- Fonseca R.O.C., Laurenz V., Mallmann G., Luguet A., Hoehne N., Jochum K.P. New constraints on the genesis and long-term stability of Os-rich alloys in the Earth's mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2012**. Vol. 87. P. 227–242.
- Goncharenko A.I. Deformation and petrostructural evolution of alpine-type ultramafic rocks. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, **1989**. 404 p. (in Russian).
- Harris D.C., Cabri L.J. Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision. *Canad. Miner.* **1991**. Vol. 29. P. 231–237.
- Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Agafonov L.V., Belyanin D.K., Damdinov B.B. Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoy and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 2. P. 259–272.
- Leblanc M. Platinum-group elements and gold in ophiolitic complexes: Distribution and fractionation from mantle to oceanic floor. *Petrol. Structural Geol.* **1991**. Vol. 5. P. 231–260.
- Lesnov F.P. Petrochemistry of polygenic mafic-hypermafic plutons of folded areas. Novosibirsk: Nauka, **1986**. 136 p. (in Russian).
- Lesnov F.P., Mongush A.A., Oidup Ch.K., Popov V.A. Structural-genetic relationships of ultramafic and gabbroides in the Kurtushiba ophiolite association (Western Sayan). In: *Ultramafic-mafic complexes of Precambrian folded areas*. Ulan-Ude: SB RAS, **2005**. P. 59–61 (in Russian).
- Lesnov F.P., Kuzhuget K.S., Mongush A.A., Oidup Ch.K. Geology, petrology and ore content of mafic-ultramafic massifs of the Tyva Republic. Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», **2019**. 350 p. (in Russian).
- Lorand J., Luguet A. Chalcophile and siderophile elements in mantle rocks: trace elements controlled by trace minerals. *Rev. Miner. Geochem.* **2016**. Vol. 81. P. 441–488.
- Luguet A., Lorand J., Alard O., Cottin J. A multi-technique study of platinum group element systematic in some Ligurian ophiolitic peridotites, Italy. *Chem. Geol.* **2004**. Vol. 208. P. 175–194.
- Luguet A., Reisberg L. Highly siderophile element and <sup>187</sup>Os signatures in noncratonic basalt-hosted peridotite xenoliths: Unravelling the origin and evolution of the Post-Archean lithospheric mantle. *Rev. Mineral. Geochem.* **2016**. Vol. 81. P. 305–367.

Luguet A., Shirey S.B., Lorand J.P., Horan M.F., Carlson R.W. Residual platinum group minerals from highly depleted harzburgites of the Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of the mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2007**. Vol. 71. P. 3082–3097.

Makeev A.B., Brianchaninova N.I. Topomineralogy of ultramafic rocks of the Polar Urals. Saint Petersburg: Nauka, **1999**. 252 p. (in Russian).

Malevsky A.Yu., Laputina I.P., Distler V.V. Behavior of platinum metals during crystallization of pyrrhotite from a sulfide melt. *Geochemistry*. **1977**. N. 10. P. 1534–1542 (in Russian).

Malitch K.N., Anikina E.V., Badanina I.Y., Pushkarev E.V., Khiller V.V., Belousova E.A. Chemical composition and osmium-isotope systematics of primary and secondary PGM assemblages from high-mg chromitite of the Nurali lherzolite massif, the South Urals, Russia. *Geol. Ore Deposits*. **2016**. Vol. 58. N. 1. P. 1–19.

Malitch K.N., Melcher F., Mühlhans H. Palladium and gold mineralization in podiform chromitite at Kraubath, Austria. *Miner. Petrol*. **2001**. Vol. 73. P. 247–277.

Murzin V.V., Malich K.N., Badanina I.Yu., Varlamov D.A., Chashchukhin I.S. Mineral associations of chromitites of the Alapaevsky dunite-harzburgite massif (Middle Urals). *Lithosphere*. **2023**. Vol. 23. N. 5. P. 740–765 (in Russian).

Novakov R.M., Moskaleva S.V., Ivanov V.V., Palamar S.V. Pentlandites and avaruites of ultramafic massif of Mount Soldatskaya (Cape Kamchatka Peninsula, Eastern Kamchatka). *Vestnik KRAUNC. Earth Sci*. **2014**. N. 2. P. 137–146 (in Russian).

Ohnenstetter M. Platinum group element enrichment in the upper mantle peridotites of the Monte Maggiore Ophiolitic Massif (Corsica, France): mineralogical evidence for ore-fluid metasomatism. *Miner. Petrol*. **1992**. Vol. 46. P. 85–107.

Pavlov N.V. Chemical composition of chromospinelides in connection with the petrographic composition of rocks of ultrabasic intrusives. In: *Proc. Geol. Inst. RAS*. **1949**. Vol. 103. P. 1–91 (in Russian).

Pinus G.V., Velinsky V.V., Lesnov F.P., Bannikov O.L., Agafonov L.V. Alpine-type hypermafic rocks of the Anadyr-Koryak fold system. Novosibirsk: Nauka, **1973**. 320 p. (in Russian).

Prichard H., Ixer R., Lord R., Maynard J., Williams N. Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite. *Canad. Miner*. **1994**. Vol. 32. P. 271–294.

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

Savelyev D.P., Filosofova T.M. Microinclusions of minerals of platinum group elements and gold in the rocks of the ophiolite complex of the Kamchatsky Mys peninsula. *Vestnik KRAUNC. Earth Sci*. **2017**. N. 2 (34). P. 5–13 (in Russian).

Savelyev D.P., Gataullin R.A. Accessory platinum mineralization in lherzolites of the Northern Kraka massif (Southern Urals). *Georesources*. **2023**. Vol. 25. N. 3. P. 208–215 (in Russian).

Semenov M.I., Zorina A.N., Kolyamkin V.M., Kachevsky L.K., Krotova T.A., Aleksandrovsky Yu.S. State geological map of the Russian Federation, Scale 1:200,000. Second edition. West Sayan series. Sheet N-46-XXXIV (Turan). Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House, **2019**. 188 p. (in Russian).

Sibilev A.K. Petrology and asbestos content of ophiolites (on the example of the Idzhim massif in the Western Sayan). Novosibirsk: Nauka, **1980**. 216 p. (in Russian).

Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V. Mineralogy and genesis of ultramafic rocks of the Kurtushiba ophiolite belt (Western Sayan). *Mineralogy*. **2022**. Vol. 8. N. 2. P. 49–62 (in Russian).

Sobolev V.S., Dobretsov N.L. Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by example of the Polar Urals and Western Sayan). Novosibirsk: Nauka, **1977**. 222 p. (in Russian).

Stockman H.V., Hlava P.F. Platinum-group minerals in Alpine chromitites from Southwestern Oregon. *Econ. Geol*. **1984**. Vol. 79. P. 491–508.

Tolstykh N.D. Platinum mineralization of the Konder and Inagli massifs. *Geosphere research*. **2018**. N. 1. P. 17–32 (in Russian).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Platinum-bearing of chromitites of the Kurtushibinsky ophiolite belt (Western Sayan): new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. N. 5. Vol. 148. P. 113–125 (in Russian), English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2020**. Vol. 62. N. 8. P. 787–795).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. First finds of platinum group minerals in ultramafites of the Kizir-Burluksky massif (Western Sayan). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2021**. Vol. 150. N. 4. P. 77–91 (in Russian).

Zhou M.-F., Lewis J., Malpas J., Munoz-Gomez N. The Mayari–Baracoa Paired Ophiolite Belt, Eastern Cuba: Implications for tectonic settings and platinum-group elemental mineralization. *Int. Geol. Rev*. **2001**. Vol. 43. P. 494–507.