



## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ ВТОРИЧНЫХ RU-OS-IR-СУЛЬФИДОВ И СУЛЬФОАРСЕНИДОВ ВЕРХ-НЕЙВИНСКОГО ДУНИТ-ГАРЦБУРГИТОВОГО МАССИВА НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

В. В. Мурзин<sup>1</sup>, И. Ю. Баданина<sup>1</sup>, К. Н. Малич<sup>1</sup>, А. В. Игнатьев<sup>2</sup>, Т. А. Веливецкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург; *murzin@igg.uran.ru*

<sup>2</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток; *velivetskaya@mail.ru*

В литературе известны лишь единичные данные об изотопном составе серы минералов платиновой группы (МПГ). Методом LA-ICP-MS изучен изотопный состав серы Ru-Os-Ir-сульфидов и сульфоарсенидов, выделенных в составе эпигенетических коррозионного и наложенного парагенезисов МПГ из россыпи р. Восточный Шишим в пределах Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива. Сульфиды коррозионного парагенезиса (лаурит, As-содержащий лаурит) замещают зерна первичных самородных минералов Os и Ru, образуя на них корочки, а МПГ наложенного парагенезиса (лаурит, ирарсит, толовкит и др.) формируются на поверхности коррозионного парагенезиса. Установлено, что вариации  $\delta^{34}\text{S}$  эпигенетических МПГ (от  $-4.6$  до  $7.6$  ‰) более широкие, чем таковые для лаурита и эрликманита первичного парагенезиса ( $0.2$ — $2.3$  ‰). Результаты интерпретированы исходя из модели выдвигания гипербазитов к поверхности и их водного метаморфизма восходящим тектоническим потоком в составе корово-мантийной смеси. На начальном этапе метаморфизма участвует мантийная сера, изотопно облегченная в условиях окисления и понижения температуры при выдвигании массива к поверхности. На заключительном этапе принимает участие сера метаморфического флюида, образованного при вовлечении изотопно-тяжелой серы вмещающих осадочных пород.

**Ключевые слова:** минералы платиновой группы, Ru-Os-сульфиды и сульфоарсениды, изотопный состав серы, Верх-Нейвинский дунит-гарцбургитовый массив, Средний Урал.

## SULFUR ISOTOPE COMPOSITION OF SECONDARY RU-OS-IR SULFIDES AND SULFOARSENIDES FROM THE VERKH-NEIVINSK DUNITE-HARZBURGITE MASSIF (MIDDLE URALS)

V. V. Murzin<sup>1</sup>, I. Yu. Badanina<sup>1</sup>, K. N. Malitch<sup>1</sup>, A. V. Ignatiev<sup>2</sup>, T. A. Velivetskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

<sup>2</sup>Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Limited data on the isotopic composition of sulfur of platinum-group minerals (PGM) are reported in the literature. The LA-ICP-MS method was used to study the S-isotopic composition of Ru-Os-Ir sulfides and sulfoarsenides forming secondary corrosion and superimposed PGM assemblages from placer deposit of the East Shishim river occurring within the Verkh-Neivinsky dunite-harzburgite massif. Sulfides from corrosion PGM assemblage (laurite, As-containing laurite) replace the grains of primary native Os and Ru minerals, forming rims on them. PGM from superimposed assemblage (laurite, irarsite, tolovkite, etc.) originated on the surface of laurite rims that form part of corrosion PGM assemblage. Variations in  $\delta^{34}\text{S}$  values of secondary PGM (from  $-4.6$  to  $7.6$  ‰) are more pronounced than those for laurite and erlichmanite from primary PGM assemblage (i. e.,  $0.2$ — $2.3$  ‰). The results are consistent with a model of the ultramafic massif ascending to the surface and subsequent water metamorphism during the tectonic flow and crust-mantle interaction. At the initial stage of metamorphism, mantle sulfur is present, isotopically lightened under oxidation conditions and temperature reduction. The final stage is marked by sulfur of the metamorphic fluid formed by the involvement of isotopically-heavy sulfur derived from the host sedimentary rocks.

**Keywords:** platinum-group minerals, Ru-Os sulfides and sulfoarsenides, sulfur isotope composition, Verkh-Neivinsky dunite-harzburgite massif, Middle Urals.

### Введение

Сульфидные и сульфоарсенидные минералы платиновой группы (МПГ) относятся к распространенным минералам хромититов различных ультрамафитовых комплексов [14]. Для офиолитовых комплексов наиболее распространены первичные сульфиды изоморфного ряда «лаурит ( $\text{RuS}_2$ ) — эрлик-

манит ( $\text{OsS}_2$ )». Сульфидно-арсенидные ассоциации МПГ обычно относятся к постмагматическим эпигенетическим, в том числе связанным с родингитизирующими растворами в ассоциации с гранатом, пироксеном, амфиболом [5] или более низкотемпературными серпентинизирующими (антгорит, хлорит) [2, 11, 17, 18].

**Для цитирования:** Мурзин В. В., Баданина И. Ю., Малич К. Н., Игнатьев А. В., Веливецкая Т. А. Изотопный состав серы вторичных Ru-Os-Ir-сульфидов и сульфоарсенидов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива на Среднем Урале // Вестник геонаук. 2020. 9(309). С. 7—13. DOI: 10.19110/geov.2020.9.2.

**For citation:** Murzin V. V., Badanina I. Yu., Malitch K. N., Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A. Sulfur isotope composition of secondary Ru-Os-Ir sulfides and sulfoarsenides from the Verkh-Neivinsk dunite-harzburgite massif (Middle Urals). Vestnik of Geosciences. 2020. 9(309). P. 7—13. DOI: 10.19110/geov.2020.9.2.

Обычные размеры Ru-Os-сульфидов, присутствующих в виде кристаллических включений в хромшпинелиде или самородных минералах платиновой группы, очень малы и не превышают 5–10 мкм. Микронные размеры МПГ накладывают весьма существенные ограничения методического характера на изучение изотопного состава серы. В россыпях часто обнаруживаются и более крупные зерна МПГ. Именно зерна лаурита из россыпей Борнео стали единственным известным в мировой практике объектом изучения изотопного состава серы МПГ [9]. В этом исследовании для высвобождения SO<sub>2</sub> и дальнейшего его масс-спектрометрического анализа сжигались крупные зерна лаурита весом 0.6–1.2 мг.

Ранее нами были получены первые данные по изотопному составу серы первичных Ru-Os-сульфидов ряда «лаурит — эрликманит» из россыпи р. Восточный Шишим в пределах Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива на Среднем Урале [7]. Для них установлены значения δ<sup>34</sup>S в диапазоне 0.2–2.3 ‰ относительно стандарта VCDT, указывающие на отсутствие или самое минимальное участие коровой серы при кристаллизации этих сульфидов. В настоящем исследовании изучен изотопный состав серы зерен МПГ из этой россыпи, отнесенных нами к вторичным (эпигенетическим).

### Характеристика объекта исследований

Изученные зерна МПГ извлечены из золото-платиноидных концентратов драги № 100, обрабатывавшей россыпь р. Восточный Шишим в южной части Верх-Нейвинского массива. Массив располагается на стыке Тагильской и Восточно-Уральской мегазон и приурочен к Серовско-Маукскому глубинному разлому. В его строении участвуют два комплекса — дунит-гарцбургитовый (O<sub>3</sub>-S<sub>1</sub>), слагающий внутреннюю часть массива, и дунит-клинопироксенит-габбровый (S<sub>2</sub>-D<sub>2</sub>), примыкающий к массиву с востока (рис. 1). В пределах обоих комплексов выявлено 68 рудопроявлений и мелких месторождений хромититовых руд, которые служили источниками МПГ для россыпей, связанных с отложениями современных и древних речных долин.

Наши данные по эпигенетическим изменениям хромититов Верх-Нейвинского массива показывают, что первичные силикатные минералы хромититов замещены агрегатом Cr-содержащего хлорита, Cr-Ti-содержащего гроссуляра, Na-содержащего кальциевого амфибола (эденита), серпентина (рис. 2, а). С этими минералами ассоциируют сульфиды никеля — миллерит NiS (до 4–6 мас. % As) и хизлевудит Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, заключенные в нерудных минералах межзернового заполнения агрегатов хромшпинелида (рис. 2, б).

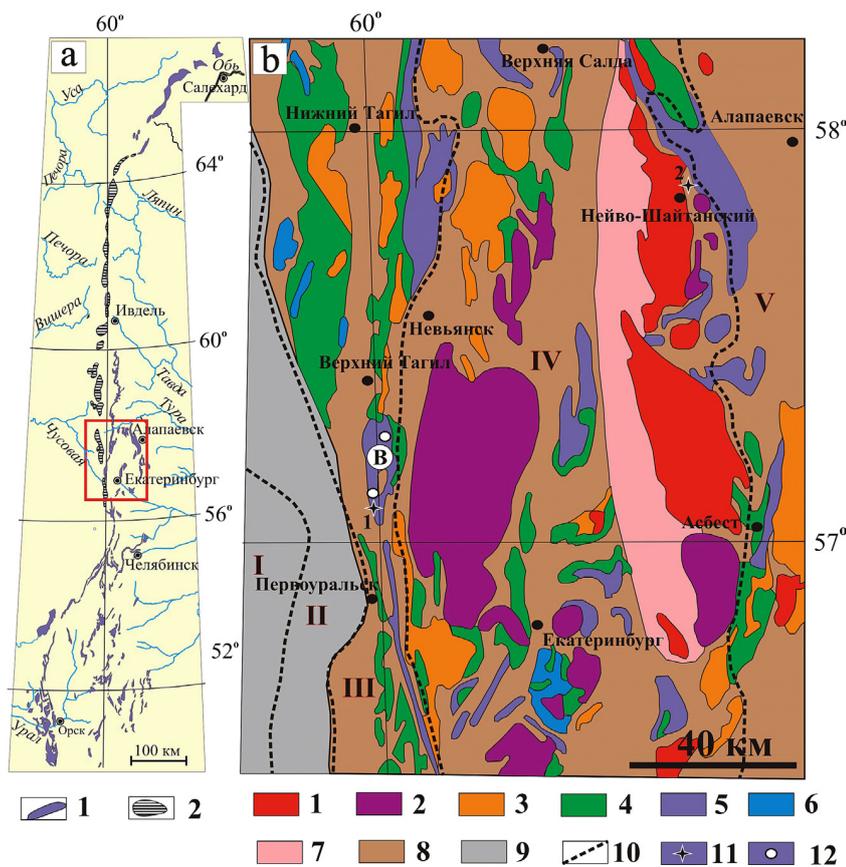


Рис. 1. а — схема расположения дунит-гарцбургитовых и дунит-клинопироксенит-габбровых массивов Урала по [3].

Массивы: 1 — дунит-гарцбургитовые; 2 — ультрамафит-габбровые в составе Платиноносного пояса. Прямоугольник соответствует врезке рис. 1, б.

б — тектоническая схема Среднего Урала и положение на ней Верх-Нейвинского (В) дунит-гарцбургитового массива:

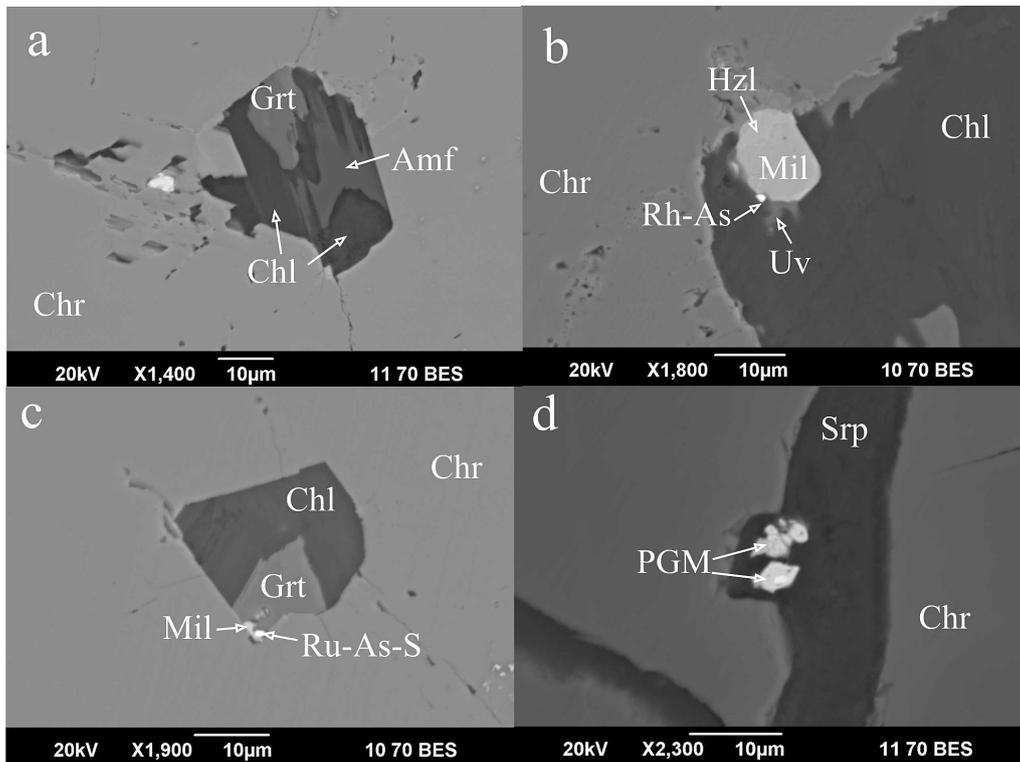
1–6 — формации интрузивных образований: 1 — гранитная, 2 — гранодиоритовая, 3 — плагиогранитовая, 4 — габбровая, 5 — дунит-гарцбургитовая, 6 — дунит-клинопироксенитовая; 7 — породы амфиболитовой, амфиболито-гнейсовой, гнейсовой и мигматитовой ассоциаций; 8 — вулканогенно-осадочные породы островодужного сектора Урала; 9 — флишевые, флишеидные, молассовые, терригенно-карбонатные и карбонатные формации континентального сектора Урала; 10 — границы мегазон (I — Западно-Уральская, II — Центрально-Уральская, III — Тагил-Магнитогорская, IV — Восточно-Уральская, V — Зауральская); 11 — местонахождение платиноидной минерализации из россыпи р. Восточный Шишим, 12 — местонахождение изученных образцов хромититов

Fig. 1. а — Scheme of location of dunit-harzburgite and dunit-clinopyroxenite-gabbro massifs of the Urals after [3].

1 — dunit-harzburgite massifs; 2 — ultramafic-gabbro massifs of the Uralian Platinum Belt. Box corresponds to inset in Fig. 1, б.

б — Tectonic scheme of the Middle Urals and position of the Verkh-Neivinsky dunit-harzburgite massiff.

1–6 — intrusive formations: (1) granite, (2) granodiorite, (3) plagiogranite, (4) gabbro, (5) dunit-harzburgite, (6) dunit-clinopyroxenite; (7) rocks of the amphibolite, amphibolite-gneiss, gneiss, and migmatite associations; (8) volcanogenic sedimentary rocks of the island arc sector of the Urals; (9) flysch, flyschoid, molasse, and terrigenous-carbonate, and carbonate formations of the continental sector of the Urals; (10) boundaries of megazones (I — Western Urals, II — Central Urals, III — Tagil-Magnitogorsk, IV — Eastern Urals; V — Trans-Urals), (11) location of PGM samples from the East Shishim river placer deposit, (12) location of the studied chromitite samples



**Рис. 2.** Минералы вторичных парагенезисов в хромититах Верх-Нейвинского массива:

a — сростание амфибола (Amf), хлорита (Chl) и граната (Grt), заключенные в хромшпинелиде (Chr); b — сростание миллерита (Mil), хизлеудита (Hzl), арсенида-родия (Rh-As) и уваровита (Uv) на контакте хлорита (Chl) и хромшпинелида (Chr); c — комплексное включение, сложенное хлоритом (Chl), гранатом (Grt), миллеритом (Mil) и фазой (Ru, Rh, Ir)-As-S (Ru-As-S) в хромшпинелиде (Chr); d — зерна МПГ (PGM), сложенные сростками фаз (Rh, Ni, Cu, Fe)-Sb, (Os >> Ru > Fe) и (Ru, Ir, Fe, Ni) в прожилке серпентина (Srp), рассекающего хромшпинелид (Chr)

**Fig. 2.** Minerals of secondary parageneses in chromitites of the Verkh-Neivinsky massif:

a — intergrowth of amphibole (Amf), chlorite (Chl) and garnet (Grt), enclosed in chromspinel (Chr); b — intergrowth of millerite (Mil), heazlewoodite (Hzl), rhodium arsenide (Rh-As) and uvarovite (Uv) at the contact of chlorite (Chl) and chromspinel (Chr); c — complex inclusion composed of chlorite (Chl), garnet (Grt), millerite (Mil) and (Ru, Rh, Ir)-As-S (Ru-As-S) phase in chromspinel (Chr); d — PGM grains (PGM), composed of intergrown phases (Rh, Ni, Cu, Fe)-Sb, (Os >> Ru > Fe) and (Ru, Ir, Fe, Ni) in the serpentine vein (Srp), dissecting chromspinel (Chr)

Выделения эпигенетических МПГ заключены в сульфидных и силикатных минералах (рис. 2, b—d). Среди них обнаружены мелкие зерна (1—5 мкм), сложенные фазами систем Rh-As, (Ru, Rh, Ir)-As-S, (Rh, Ni, Cu, Fe)-Sb, (Ru, Ir) и (Os, Ru, Fe) (рис. 2, b—d).

На основании взаимоотношений между минеральными фазами в россыпях Верх-Нейвинского массива выделены первичные, а также вторичные (коррозионный и наложенный) парагенезисы МПГ [6]. Первичные МПГ представлены интерметаллидами рядов Os-Ir-Ru и Pt-Fe, а также сульфидами ряда «лаурит — эрликманит». Список минералов эпигенетических МПГ включает минералы самородных металлов, сульфиды, сульфоарсениды, арсениды, сульфоантимониды и многие другие минералы [1].

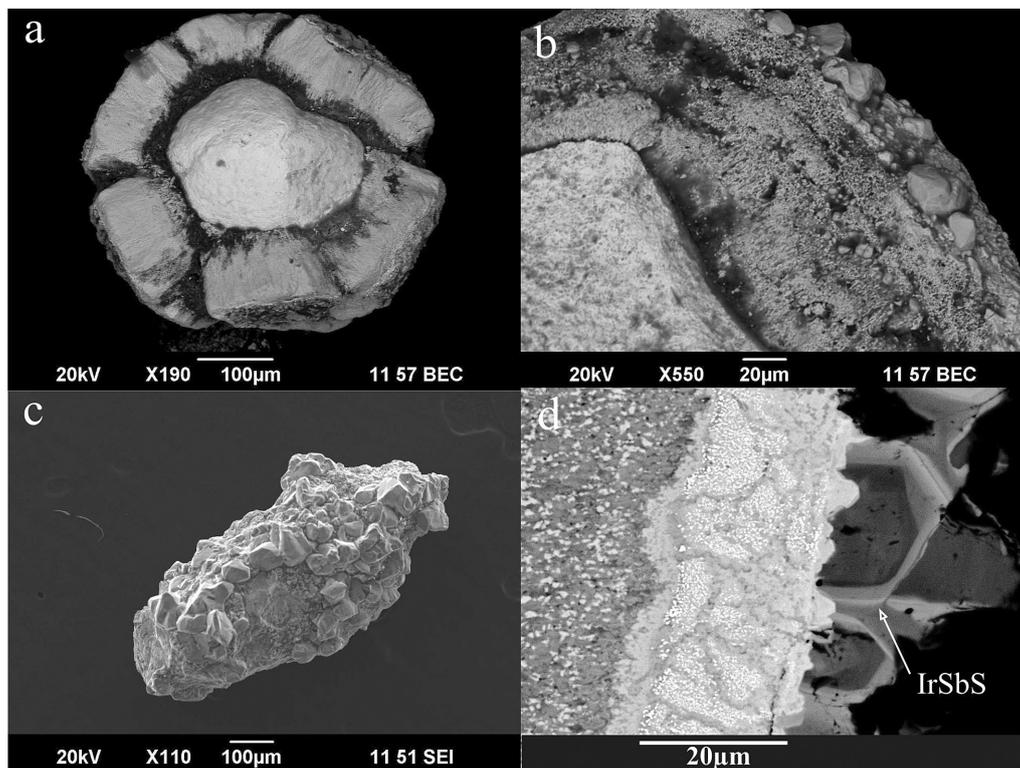
### Образцы и методы исследования

Отобранные для настоящего исследования МПГ коррозионного парагенезиса замещают зерна первичных самородных Os-Ir-Ru-минералов, образуя на их корочки мощностью до 0.2 мм (рис. 3, a). Корочки сложены тонкозернистым агрегатом пористых самородных фаз, часто с примесями Fe, Ni, As, и новообразованными мышьяксодержащими Ru-Os-сульфидами

ряда «лаурит — эрликманит». Микроскопически это весьма тонкозернистые пористые агрегаты самородных, сульфидных и сульфоарсенидных фаз, имеющие слоистую, концентрически-зональную, иногда субграфическую структуру (рис. 3, b, d). Минералы вторичного наложенного парагенезиса (лаурит, ирарсит, толовкит и другие) образовались позднее коррозионного и в виде кристаллов нарастают на коррозионные пленки, выполняют трещины в них (рис. 3, b—d).

LA-ICP-MS-анализ изотопного состава серы на естественной поверхности зерен МПГ выполнен в ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) по методике, описанной в [12]. Для абляции сульфидов с пространственным разрешением 80—100 мкм был использован короткоимпульсный ультрафиолетовый лазер Integra-C (Quantronix Lasers, США). Соотношение изотопов серы измеряли на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Fisher Scientific, Germany). Измерения проведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3. Стандартное отклонение величины  $\delta^{34}\text{S}$  составило  $\pm 0.2\text{‰}$  (VCDT).

Изотопный анализ предварялся изучением морфологии и микроскульптуры поверхности зе-



**Рис. 3.** Соотношения МПГ вторичных коррозионного и наложенного парагенезисов:

a — оболочка мышьяковистого лаурита коррозионного парагенезиса на зерне самородного Os-Ir-Ru-сплава; b — ядерная часть Os-Ir-Ru-сплава с развитым по нему пористым агрегатом МПГ коррозионного парагенезиса и обрастанием последнего кристалликами лаурита наложенного парагенезиса; c — кристаллы лаурита и ирарсита наложенного парагенезиса на поверхности зерна Os-Ir-Ru-сплава с оболочкой МПГ коррозионного парагенезиса; d — срез краевой части зерна МПГ с пористым коррозионным парагенезисом и кристалликами толовкита (IrSbS) наложенного парагенезиса

**Fig. 3.** Relationship of PGM from secondary corrosion and superimposed mineral assemblages:

a — envelope of As-bearing laurite from corrosion assemblage occurring on a grain of native Os-Ir-Ru alloy overgrown by a porous PGM aggregate forming part of corrosion assemblage, mantled by crystals of laurite from superimposed assemblage; c — crystals of laurite and irarsite from superimposed mineral assemblage on the surface of Os-Ir-Ru alloy grain with an envelope of PGM from corrosion assemblage; d — slice of the edge part of the PGM grain from porous corrosion assemblage and tolovkite (IrSbS) crystals of superimposed assemblage

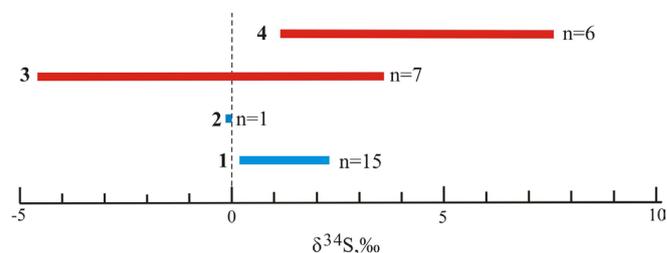
рен, а также определением их химического состава на сканирующем электронном микроскопе СЭМ JSM-6390L, Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80, Oxford Instruments в ЦКП «Геоаналитик» (Институт геологии и геохимии УрО РАН).

### Результаты исследований

Химический состав эпигенетических фаз, определенный на естественной поверхности изученных зерен, и изотопный состав серы приведен в таблице. Вещество коррозионного парагенезиса, испарившееся при изотопном анализе, является смесью различных фаз, принадлежащих системе (Os, Ir, Ru)-(As, S). Оно характеризуется значениями  $\delta^{34}\text{S}$ , варьирующими от  $-4.6$  до  $3.6$  ‰. Среди минералов наложенного парагенезиса проанализированы зерна, отвечающие по составу лауриту (до  $1.76$  мас. % As) и ирарситу. В этом парагенезисе  $\delta^{34}\text{S}$  составило  $1.2$ – $7.6$  ‰ для лаурита и  $4.0$ – $6.6$  ‰ для ирарсита.

В целом вариации  $\delta^{34}\text{S}$ -сульфидов вторичных парагенезисов от  $-4.6$  до  $7.6$  ‰ значительно более широкие, нежели таковые для первичного (рис. 4). Для

коррозионного парагенезиса характерно отклонение  $\delta^{34}\text{S}$  минералов от хондритового нулевого значения в сторону как облегчения (до  $-4.6$  ‰), так и утяжеления (до  $3.6$  ‰), в то время как МПГ наложенно-



**Рис. 4.** Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S}$ , ‰) Ru-Os-сульфидов ряда «лаурит — эрликманит» (1) и ирарсита (2) первичного парагенезиса [7] и МПГ вторичных коррозионного (3) и наложенного (4) парагенезисов

**Fig. 4.** Sulfur isotopic composition ( $\delta^{34}\text{S}$ , ‰) of Ru-Os sulfides of laurite–erlichmanite series (1) and irarsite (2) within primary assemblage [7] and PGM from secondary corrosion (3) and superimposed (4) mineral assemblages



**Изотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S}$ ) и химический состав вторичных сульфидных и сульфоарсенидных МПГ**  
**Sulfur isotopic composition ( $\delta^{34}\text{S}$ ) and chemical composition of secondary sulfide and sulfoarsenide PGM**

№ зер. Analysis number	$\delta^{34}\text{S}$ (VCDT, ‰)	Химический состав, мас. % / Chemical composition, wt. %									
		S	As	Sb	Ni	Ru	Rh	Ag	Os	Ir	Pt
1	0.1	24.00	11.04	-	-	15.35	-	1.51	23.92	24.18	-
2	2.5	17.38	18.94	-	0.99	9.56	-	-	11.56	41.57	-
3	-4.6	11.85	25.97	-	1.95	3.07	-	-	7.35	49.81	-
4	1.4	34.89	5.24	-	-	44.64	-	-	-	15.23	-
5	3.6	14.64	27.13	-	2.09	5.61	-	-	7.27	43.26	-
6	-4.6	12.91	27.64	-	-	5.7	5.11	-	-	34.84	13.81
7	-2.3	16.2	22.02	-	-	4.4	-	-	11.65	45.73	-
8	1.2	37.73	-	-	-	56.62	-	-	5.65	-	-
9	4.0	11.5	24.2	-	-	-	-	-	-	64.3	-
10	7.6	38.4	1.76	-	-	59.83	-	-	-	-	-
11	3.2	36.83	1.06	-	-	55.01	-	-	-	7.1	-
12	6.6	11.62	25.07	2.56	-	-	-	-	-	60.75	-
13	5.3	14.62	27.78	-	-	4.9	4.39	-	-	48.32	-

*Примечания.* Химический состав нормирован на 100 %. Парагенезисы МПГ: 1–7 — коррозионный (смеси сульфидных и сульфоарсенидных фаз); 8–13 — наложенный (8, 10, 11 — лаурит; 9, 12, 13 — ирарсит). Прочерк — элемент не обнаружен.

**Note.** Chemical composition normalized to 100 %. PGM from corrosion (an. 1–7) and superimposed (an. 8-13) mineral assemblages. Analyses 1–7 correspond to a mixture of sulfide and sulfoarsenide phases; an. 8, 10, 11 — laurite, an. 9, 12 and 13 — irarsite. Dash — element was not detected.

го парагенезиса характеризуются устойчиво утяжеленным изотопным составом серы ( $\delta^{34}\text{S}$  в диапазоне 1.2–7.6 ‰).

### Обсуждение результатов и основные выводы

Значение  $\delta^{34}\text{S}$  конвективной мантии близко к 0 и составляет ( $0.04 \pm 0.31$ ) ‰ [10]. Считается, что значения  $\delta^{34}\text{S}$ , выходящие за ( $0 \pm 2$ ) ‰, являются следствием процессов корово-мантийного взаимодействия (контаминации расплавом коровой серы) как в условиях мантии, так и при выдвигении мантийных пород к поверхности [8, 16]. Значения  $\delta^{34}\text{S}$  первичного парагенезиса в диапазоне 0.2–2.3 ‰ [7] лишь немного превышают мантийную нулевую метку, что может быть связано с вариациями степени окисленности серы (соотношения окисленных и восстановленных ее форм) в расплаве.

Вслед за публикациями [2, 5, 11, 18] наши исследования подтверждают связь сульфидно-арсенидных МПГ в Верх-Нейвинском массиве с вторичными изменениями руд, выраженными в ассоциации их с водосодержащими минералами (амфиболом, хлоритом, серпентином) и сульфидами никеля (хизлевудитом, миллеритом), характерными для серпентинитов.

Установленный нами существенно расширенный диапазон изотопного состава серы МПГ вторичных парагенезисов по отношению к первичному может быть обусловлен рядом факторов: 1) смешением мантийной серы с коровой — облегченной осадочных сульфидов или утяжеленной сульфатной; 2) химизмом растворов (фугитивность кислорода и значениями рН), который определяет соотношение окисленных и восстановленных форм серы в раство-

ре [15]; 3) увеличением разделения изотопов серы между раствором и минералом с понижением температуры. Все эти факторы могут быть реализованы в условиях выдвигения Верх-Нейвинского массива из мантии в верхнюю кору по механизму, предложенному для Карабашского массива гипербазитов на Южном Урале [4, 13]. В этой модели в результате горизонтального сжатия (коллизии) верхнемантийные и вулканогенно-осадочные нижнекоровые породы (корово-мантийная смесь) выжимаются к поверхности и сопровождаются водным автотоморфизмом.

Исходя из этой модели, можно предположить, что в образовании Ru-Os-Ir-сульфидов и сульфоарсенидов Верх-Нейвинского массива принимала участие сера как мантийного, так и корового происхождения. Мантийная сера характерна для минералов ряда «лаурит — эрликманит» и ирарсита первичного парагенезиса. МПГ вторичных парагенезисов образовались при водном метаморфизме хромититов. В начальный период процесса метаморфизма участвовала изотопно-облегченная сера, предположительно за счет понижения температуры и увеличения фугитивности кислорода (окисления мантийной серы) при выдвигении корово-мантийной смеси к поверхности. В заключительный период преобладала сера метаморфического флюида, образованного при вовлечении изотопно-тяжелой серы вмещающих осадочных пород.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (проект № АААА-А18-118052590026-5) при поддержке РФФИ (грант № 18-05-00988-а). Авторы признательны Д. А. Варламову за содействие в изучении минералов платиновой группы Верх-Нейвинского массива, С. В. Ленехе и И. А. Готтман за проведение исследований на СЭМ.*



## Литература

1. Варламов Д. А., Мурзин В. В. Платинометалльная минерализация Верх-Нейвинского ультраосновного массива (Средний Урал): первичные и вторичные парагенезисы и новые минеральные виды // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: Материалы конференции, Иркутск: Отгиск, 2019. С. 70—75.
2. Дистлер В. В., Крячко В. В., Лапутина И. П. Эволюция парагенезисов платиновых металлов в альпинотипных гипербазитах // Геология рудных месторождений. 1986. № 5. С. 16—33.
3. Ефимов А. А. Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 1984. 232 с.
4. Кисин А. Ю., Мурзин В. В., Пritchин М. Е. Тектоническая позиция золотого оруденения горы Карабаш (Южный Урал) по результатам изучения малых структурных форм // Литосфера. 2016. № 4. С. 79—91.
5. Малич К. Н., Аникина Е. В., Баданина И. Ю., Белосова Е. А., Пушкарёв Е. В., Хиллер В. В. Вещественный состав и осмиевая изотопия первичных и вторичных ассоциаций минералов платиновой группы магнезиальных хромититов Нуралинского лерцолитового массива (Ю. Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 1. С. 3—22.
6. Мурзин В. В., Суставов С. Г., Мамин Н. А. Золотая и платиноидная минерализация россыпей Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал). Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1999. 93 с.
7. Мурзин В. В., Баданина И. Ю., Малич К. Н., Игнатиев А. В., Веливецкая Т. А. Изотопный состав серы Ru-Os-сульфидов Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, Средний Урал: Первые данные // Доклады АН. 2019. Т. 488. № 2. С. 185—188.
8. Пушкарёв Ю. Д. Два типа взаимодействия корового и мантийного вещества и новый подход к проблемам глубинного рудообразования // Доклады АН. 1997. Т. 335. № 4. С. 524—526.
9. Hattori K. H., Cabri L. J., Johanson B., Zientek M. L. Origin of placer laurite from Borneo: Se and As contents, and S isotopic compositions // Mineralogical Magazine. 2004. V. 68. № 2. P. 353—368.
10. Gao X., Thiemens M. H. Variations in the isotopic composition of sulfur in enstatite and ordinary chondrites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1993. V. 57. P. 3171—3176.
11. Garuti G., Zaccarini F., Proenza J. A., Thalhammer O. A. R., Angeli N. Platinum-Group Minerals in Chromitites of the Niquelândia Layered Intrusion (Central Goias, Brazil): Their Magmatic Origin and Low-Temperature Reworking during Serpentinization and Lateritic Weathering // Minerals. 2012. V. 2. P. 365—384.
12. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiya S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V., Levitskii V. V. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution // Chemical Geology. 2018. V. 493. P. 316—326.
13. Murzin V. V., Chudnenko K. V., Palyanova G. A., Varlamov D. A., Naumov E. A., Pirajno, F. Physicochemical model of formation of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodings of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia) // Ore Geol. Rev. 2018. V. 93. P. 81—97.
14. O'Driscoll B., González-Jiménez J. M. Petrogenesis of the platinum-group minerals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2016. V. 81. P. 489—578.
15. Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits // Econ. Geol. 1972. V. 67. P. 551—578.
16. Ripley E. M., Li C. Applications of stable and radiogenic isotopes to magmatic Cu-Ni-PGE deposits: examples and cautions // Earth Science Frontiers. 2007. V. 14. № 5. P. 124—132.
17. Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G. Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia) // Ore Geology Reviews. 2008. V. 33. P. 20—30.
18. Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Kazakov I. Platinum-group minerals and other accessory phases in chromite deposits of the Alapaevsk ophiolite, Central Urals, Russia // Minerals. 2016. V. 6. № 4. P. 108.

## References

1. Varlamov D. A., Murzin V. V. *Platinometal'naya mineralizatsiya Verkh-Neyvinskogo ul'traosnovnogo massiva (Sredniy Ural): pervichnyye i vtorichnyye paragenезisy i novyye mineral'nyye vidy* (Platinum mineralization of the Verkh-Neyvinsky ultramafic massif (Middle Urals): primary and secondary parageneses and new mineral species). Ultramafite-mafic complexes: geology, structure, ore potential. Proceedings of the conference, Irkutsk: publishing house Ottisk, 2019, pp. 70—75.
2. Distler V. V., Kryachko V. V., Laputina I. P. *Evolutsiya paragenезisov platinovykh metallov v al'pinotipnykh giperbazitakh* (Evolution of parageneses of platinum metals in alpine-type hyperbasites). Geology of ore deposits, 1986, 5, pp. 16—33.
3. Efimov A. A. *Gabbro-giperbazitovyye komplekсы Urala i problema ofiolitov* (Gabbro-hyperbasite complexes of the Urals and the problem of ophiolites). Moscow: Nauka, 1984. 232 p.
4. Kisin A. Yu., Murzin V. V., Pritchyn M. E. *Tektonicheskaya pozitsiya zolotogo orudneniya gory Karabash (Yuzhnyy Ural) po rezul'tatam izucheniya malyykh strukturykh form* (Tectonic position of gold mineralization of the Karabash Mountain (South Urals) based on the results of studying small structural forms). Lithosphere. 2016, 4, pp. 79—91.
5. Malitch K. N., Anikina E. V., Badanina I. Yu., Belousova E. A., Pushkarev E. V., Hiller V. V. *Veshchestvennyy sostav i osmiyevaya izotopiya pervichnykh i vtorichnykh assotsiatsiy mineralov platinovoy gruppy magnezial'nykh khromititov Nuralinskogo lertsolitovogo massiva (YU. Ural, Rossiya)* (Material composition and osmium isotopies of primary and secondary associations of minerals of the platinum group of magnesian chromitites of the Nuralinsky lherzolite massif (Yu. Ural, Russia). Geology of ore deposits. 2016, 58(1), pp. 3—22.
6. Murzin V. V., Sustavov S. G., Mamin N. A. *Zolotaya i platinoidnaya mineralizatsiya rossypey Verkh-Neyvinskogo massiva al'pinotipnykh giperbazitov (Sredniy Ural)* (Gold and platinoid mineralization of placers of the Verkh-Neyvinsky massif of alpine-type hyperbasites (Middle Urals)). Yekaterinburg: Ed. UGGGA, 1999. 93 p.
7. Murzin V. V., Badanina I. Yu., Malitch K. N., Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A. *Izotopnyy sostav sery Ru-Os sul'fidov Verkh-Neyvinskogo dunit-gartsburgitovogo massiva, Sredniy Ural: Pervyye dannyye* (Sulfur Isotope Composition of Ru—Os Sulfides from the Verkh-Neivinsky Dunite-Harzburgite Massif (Middle Urals, Russia): New Data). Reports of the Academy of Sciences. 2019, 488(2), pp. 185—188.
8. Pushkarev Yu. D. *Dva tipa vzaimodeystviya korovogo i mantiynogo veshchestva i novyy podkhod k problemam glubinnogo rudoobrazovaniya* (Two types of interaction of crustal and man-



the matter and a new approach to the problems of deep ore formation). Reports of the Academy of Sciences. 1997, 335(4), p. 524–526.

9. Hattori K. H., Cabri L. J., Johanson B., Zientek M. L. Origin of placer laurite from Borneo: Se and As contents, and S isotopic compositions. *Mineralogical Magazine*. 2004, 68(2), pp. 353–368.

10. Gao X., Thiemens M. H. Variations in the isotopic composition of sulfur in enstatite and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993, 57, pp. 3171–3176.

11. Garuti G., Zaccarini F., Proenza J. A., Thalhammer O. A. R., Angeli N. Platinum-Group Minerals in Chromitites of the Niquelândia Layered Intrusion (Central Goiás, Brazil): Their Magmatic Origin and Low-Temperature Reworking during Serpentinization and Lateritic Weathering. *Minerals*. 2012, 2, pp. 365–384.

12. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiya S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V., Levitskii V. V. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chemical Geology*. 2018, 493, pp. 316–326.

13. Murzin V. V., Chudnenko K. V., Palyanova G. A., Varlamov D. A., Naumov E. A., Pirajno, F. Physicochemical model of formation of Cu-Ag-Au-Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia). *Ore Geol. Rev.* 2018, 93, pp. 81–97.

14. O'Driscoll B., González-Jiménez J. M. Petrogenesis of the platinum-group minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2016, 81, pp. 489–578.

15. Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.* 1972, 67, pp. 551–578.

16. Ripley E. M., Li C. Applications of stable and radiogenic isotopes to magmatic Cu-Ni-PGE deposits: examples and cautions. *Earth Science Frontiers*. 2007, 14(5), pp. 124–132.

17. Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G. Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia). *Ore Geology Reviews*. 2008, 33, pp. 20–30.

18. Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G., Kazakov I. Platinum-group minerals and other accessory phases in chromite deposits of the Alapaevsk ophiolite, Central Urals, Russia. *Minerals*. 2016, 6(4), pp. 108.

Поступила в редакцию / Received 17.08.2020