

УДК 546.027:546.22+549.324.35(470.5)

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ Ru–Os-СУЛЬФИДОВ ВЕРХ-НЕЙВИНСКОГО ДУНИТ-ГАРЦБУРГИТОВОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ, РОССИЯ): ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ

В. В. Мурзин^{1,*}, И. Ю. Баданина¹, К. Н. Малич¹, А. В. Игнатъев¹, Т. А. Веливецкая²

Представлено академиком РАН В.А. Коротеевым 20.04.2018 г.

Поступило 25.04.2018 г.

Впервые охарактеризованы особенности химического и S-изотопного составов Ru–Os-сульфидов, представленных минералами изоморфного ряда лаурит (RuS₂)–эрликманит (OsS₂) в составе первичного парагенезиса минералов платиновой группы Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива, типичного представителя мантийной офиолитовой ассоциации Урала. Полученные результаты по изотопному составу серы свидетельствуют в пользу мантийного источника рудного вещества Ru–Os-сульфидов.

Ключевые слова: Ru–Os-сульфиды, лаурит, эрликманит, изотопный состав серы, Верх-Нейвинский дунит-гарцбургитовый массив, Средний Урал.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524882185-188>

Изотопы серы (³²S, ³³S, ³⁴S и ³⁶S) являются важными трассерами мантийных, магматических, гидротермальных и биологических процессов на Земле и в Солнечной системе [9]. Начиная с исследования [15], изотопный состав серы мантии Земли считается однородным со средним значением δ³⁴S равным 0,0‰, неотличимым от хондритов (δ³⁴S = 0,04 ± 0,31‰, n = 24 [10, 11]). Ru–Os-сульфиды из подформных хромититов океанической мантии являются идеальными объектами для выявления изотопного состава источников рудного вещества, из которых они были образованы ([2, 8, 12] и др.). Изотопный состав серы Ru–Os-сульфидов океанической мантии впервые был изучен К. Хаттори и др. [13]. Предметом нашего сообщения являются новые данные по химическому и S-изотопному составу Ru–Os-сульфидов, представленных минералами изоморфного ряда лаурит (RuS₂)–эрликманит (OsS₂) из первичного парагенезиса минералов платиновой группы (МПП) Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива – типичного представителя мантийной офиолитовой ассоциации Урала ([1, 6] и др.). Полученные результаты по изотопии серы свидетельствуют в пользу мантийного источника рудного вещества Ru–Os-сульфидов.

Для исследования морфологии и химического состава Ru–Os-сульфидов были использованы сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ (СЭМ JSM-6390L, Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80, Oxford Instruments, ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург). Для определения изотопного состава серы in-situ в Ru–Os-сульфидах использовали масс-спектрометрический метод с лазерной абляцией (ультрафиолетовый лазер Integra-C, “Quantronix Lasers”, США) и масс-спектрометр MAT-253 (“Thermo Fisher Scientific”, Germany, ЦКП ДВГИ ДВО РАН, Владивосток). Результаты измерений изотопного состава серы рассчитаны относительно международного стандарта VCDT по формуле δ³⁴S (‰) = {[(³⁴S/³²S)образца – (³⁴S/³²S)стандарт]/(³⁴S/³²S)стандарт} × 1000. Точность анализов δ³⁴S составляла ±0,1‰ (2σ). Детальная характеристика аналитических методов приведена ранее в ряде работ ([3, 4] и др.).

Выбранные для исследования 15 образцов Ru–Os-сульфидов были отобраны из четвертичных отложений р. Восточный Шишим в южной части Верх-Нейвинского массива (рис. 2 в [6]). Ru–Os-сульфиды представлены изометричными, часто хорошо ограниченными кристаллами размером 0,2–0,5 мм (рис. 1). По химическому составу они соответствуют лауриту, Os-содержащему лауриту, Ru-содержащему эрликманиту и эрликманиту, образующими непрерывный ряд твёрдых растворов (табл. 1, Ru # изменяется от 95 до 0).

Значения δ³⁴S в Ru–Os-сульфидах изменяются в незначительных пределах – от 0,2 до 2,3 ‰ (сред-

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург

² Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

* E-mail: murzin@igg.uran.ru

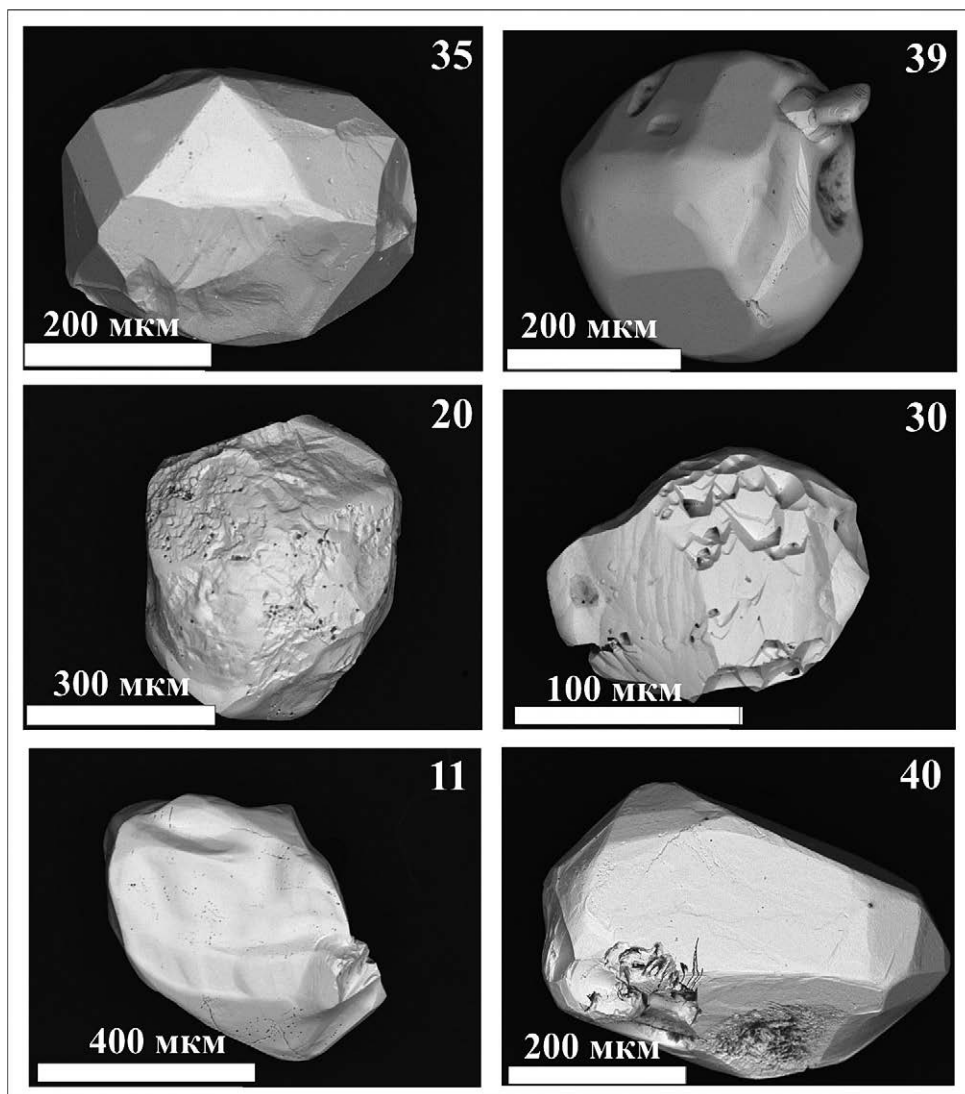


Рис. 1. Морфология типичных зёрен лаурита (обр. 35 и 39), Ru-содержащего эрликманита (обр. 20 и 30) и эрликманита (обр. 11 и 40). Все изображения в обратно-рассеянных электронах с вещественным контрастом.

нее из 15 определений $1,29\text{‰}$ при среднеквадратичном отклонении $0,62\text{‰}$, табл. 1, рис. 2). Характерно, что среднее значение $\delta^{34}\text{S}$ для лаурита и Os-содержащего лаурита ($1,49 \pm 0,65\text{‰}$, $n = 8$) в пределах погрешности соответствует таковому для Ru-содержащего эрликманита и эрликманита ($1,06 \pm 0,53\text{‰}$, $n = 7$).

Считается, что значения $\delta^{34}\text{S}$, выходящие за пределы $0 \pm 2\text{‰}$, являются следствием процессов корово-мантийного взаимодействия (при вкладе коровой серы) как в условиях мантии [7], так и при становлении мантийных магм в коровых условиях ([14] и др.). Новые данные по изотопному составу серы Ru–Os-сульфидов первичного парагенезиса МПГ Верх-Нейвинского массива ($\delta^{34}\text{S} = 1,29 \pm 0,65\text{‰}$) оказались близки к таковым в Ru–Os-сульфидах из россыпей Борнео ($\delta^{34}\text{S} = 1,16 \pm 0,36\text{‰}$

[13]). В обоих случаях Ru–Os сульфиды пространственно связаны с мантийными разрезами дунит-гарцбургитовых массивов офиолитовой ассоциации. Таким образом, сходство S-изотопного состава Ru–Os-сульфидов с таковым хондритов ($\delta^{34}\text{S} = 0,04 \pm 0,31\text{‰}$, $n = 24$ [10, 11]) предполагает, что изотопный состав серы Ru–Os-сульфидов не был подвержен изменению после их образования. Обоснование о глубинном источнике серы согласуется с результатами изучения изотопной систематики осмия Os-содержащих МПГ Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива. Выявленные субхондритовые значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ для Ru–Os-сульфидов ($0,1173\text{--}0,1251$, $n = 17$ [5]) и Ru–Os–Ir-сплавов ($0,1162\text{--}0,1227$, $n = 28$ [2]) свидетельствуют в пользу субхондритового источника рудного вещества платиноидной минерализации.

Таблица 1. Химический и S-изотопный состав Ru–Os-сульфидов первичного парагенезиса Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива

| № обр. | Минерал | Мас. % | | | | | Ат. % | | | | Ru# | $\delta^{34}\text{S}$, ‰ |
|------------------|---------|--------|-------|------|-------|--------|-------|-------|------|-------|-----|---------------------------|
| | | Ru | Os | Ir | S | Сумма | Ru | Os | Ir | S | | |
| 6 | Lau | 35,95 | 25,77 | 3,48 | 34,02 | 99,22 | 22,65 | 8,63 | 1,15 | 67,57 | 72 | 1,3 |
| 23 | Lau | 53,78 | 5,45 | 2,69 | 37,23 | 99,15 | 30,65 | 1,65 | 0,81 | 66,89 | 95 | 1,4 |
| 35 | Lau | 44,09 | 15,30 | 5,38 | 34,98 | 99,75 | 26,67 | 4,92 | 1,71 | 66,70 | 84 | 1,5 |
| 39 | Lau | 33,51 | 25,29 | 6,4 | 32,92 | 98,12 | 21,75 | 8,72 | 2,18 | 67,35 | 71 | 1,3 |
| 42 | Lau | 40,97 | 15,16 | 8,23 | 34,27 | 98,63 | 25,39 | 4,99 | 2,68 | 66,94 | 84 | 2,3 |
| 14 | Lau | 37,80 | 22,81 | 4,37 | 34,03 | 99,00 | 23,70 | 7,60 | 1,44 | 67,26 | 76 | 2,2 |
| 16 | Os-Lau | 25,3 | 33,78 | 8,44 | 30,73 | 98,25 | 17,50 | 12,42 | 3,07 | 67,01 | 59 | 0,2 |
| 17 | Os-Lau | 29,26 | 38,91 | 0,00 | 30,89 | 99,06 | 19,86 | 14,04 | 0,00 | 66,10 | 59 | 1,7 |
| 1 | Ru-Erl | 18,58 | 41,46 | 9,23 | 30,06 | 99,33 | 13,25 | 15,71 | 3,46 | 67,58 | 46 | 1,4 |
| 20 | Ru-Erl | 18,99 | 46,86 | 3,37 | 29,53 | 98,75 | 13,69 | 17,95 | 1,28 | 67,09 | 43 | 1,4 |
| 30 | Ru-Erl | 16,71 | 50,41 | 2,55 | 28,7 | 98,37 | 12,35 | 19,80 | 0,99 | 66,86 | 38 | 0,7 |
| 4 | Erl | 7,86 | 57,58 | 5,37 | 27,08 | 97,89 | 6,21 | 24,16 | 2,23 | 67,41 | 20 | 1,8 |
| 11 | Erl | 0,00 | 66,26 | 8,9 | 25,28 | 100,44 | 0,00 | 29,44 | 3,91 | 66,65 | 0 | 0,9 |
| 13 | Erl | 4,10 | 62,89 | 5,31 | 26,05 | 98,35 | 3,35 | 27,30 | 2,28 | 67,08 | 11 | 1 |
| 40 | Erl | 1,00 | 68,14 | 5,04 | 26,08 | 100,26 | 0,82 | 29,66 | 2,17 | 67,35 | 3 | 0,2 |
| Среднее (n = 15) | | | | | | | | | | | | 1,29 |

Примечание. Lau – лаурит, Os-Lau – Os-содержащий лаурит, Erl – эрликманит, Ru-Erl – Ru-содержащий эрликманит. $Ru\# = 100 \times Ru_{\text{ат. \%}} / (Os + Ru)_{\text{ат. \%}}$.

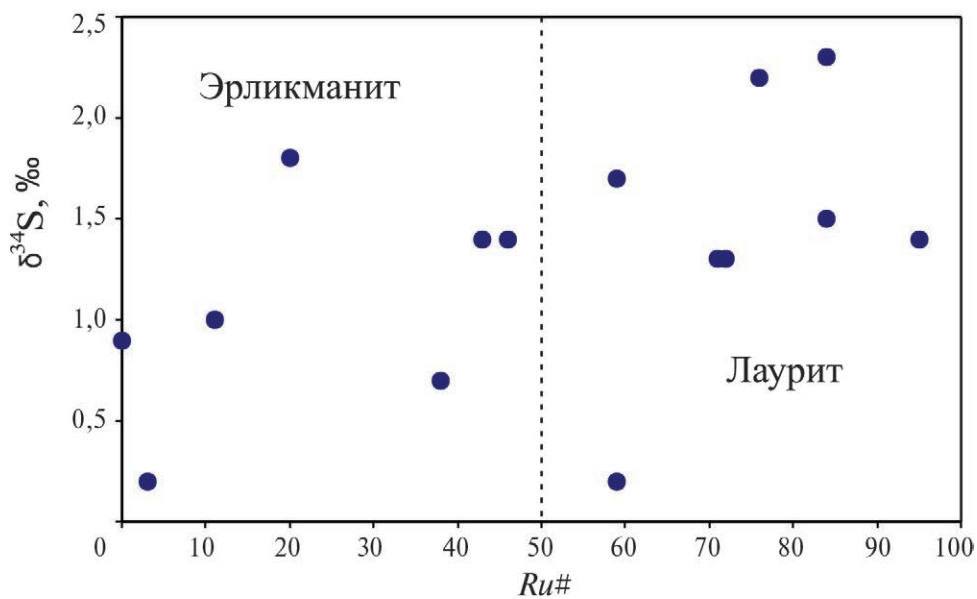


Рис. 2. Изотопный состав серы Ru–Os-сульфидов первичного парагенезиса МПГ Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива.

Благодарности. Авторы признательны С.В. Лепехе за помощь при проведении минералогических исследований.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (проект № 0393–2016–0017) при поддержке РФФИ (грант № 18–05–00988-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баданина И.Ю., Жаркова Е.В., Кадик А.А. и др. // Геохимия. 2015. Т. 53. № 7. С. 661–666.
2. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Белоусова Е.А. и др. // Тр. Ин-та геологии и геохимии акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН. 2014. В. 161. С. 167–172.

3. Баданина И.Ю., Малич К.Н., Мурзин В.В. и др. // Тр. Ин-та геологии и геохимии акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН. 2013. В. 160. С. 188–192.
4. Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А. // Масс-спектрометрия. 2013. Т. 10. № 4. С. 255–263.
5. Малич К.Н., Баданина И.Ю., Белоусова Е.А., Мурзин В.В. // ДАН. 2018. Т. 483. № 2. С. 188–191.
6. Мурзин В.В., Сустанов С.Г., Мамин Н.А. Золотая и платиноидная минерализация россыпей Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал). Екатеринбург: УГГА, 1999. 93 с.
7. Пушкарев Ю.Д. // ДАН. 1997. Т. 355. № 4. С. 524–526.
8. Badanina I.Yu., Malitch K.N., Lord R.A., et al. // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 75. P. 174–185.
9. Faure G., Mensing T.M. *Isotopes: principles and applications*. 3rd ed. Hoboken, N. J.: J. Wiley, 2005. 897 p.
10. Gao X., Thiemens M.H. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1993. V. 57. P. 3159–3169.
11. Gao X., Thiemens M.H. // *Geochim et Cosmochim Acta.* 1993. V. 57. P. 3171–3176.
12. González-Jiménez J.M., Griffin W.L., Gervilla F., et al. // *Lithos.* 2014. V. 189. P. 127–139.
13. Hattori K.H., Cabri L.J., Johanson B., Zientek M.L. // *Mineral. Magazine.* 2004. V. 68. № 2. P. 353–368.
14. Ripley E.M., Li C. // *Earth Science Frontiers.* 2007. V. 14. № 5. P. 124–132.
15. Thode H., Monster J., Dunford H. // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1961. V. 25. P. 159–174.

**SULFUR ISOTOPE COMPOSITION OF Ru-Os SULFIDES
FROM THE VERKH-NEIVINSKY DUNITE-HARZBURGITE MASSIF
(MIDDLE URALS, RUSSIA): NEW DATA**

V. V. Murzin¹, I. Yu. Badanina¹, K. N. Malitch¹, A. V. Ignatiev², T. A. Velivetskaya²

¹*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation*

²*Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.A. Koroteev April 20, 2018

Received April 25, 2018

This study presents the first data set of sulfur isotope compositions of primary Ru-Os sulfides, represented by laurite (RuS₂) – erlichmanite (OsS₂) series, within a primary platinum-group mineral (PGM) assemblage derived from the Verkh-Neivinsky dunite-harzburgite massif, a typical example of the mantle ophiolite association at the Middle Urals. The S-isotope signatures of Ru-Os sulfides studied are consistent with derivation of the ore material from a mantle source for Ru-Os sulfides.

Keywords: Ru-Os sulfides, laurite, erlichmanite, sulfur isotope composition, Verkh-Neivinsky dunite-harzburgite massif, Middle Urals.