ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 507, № 2, с. 194–201

ГЕОХИМИЯ

УДК 550.42(571.51)

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ Ru–Os-СУЛЬФИДОВ ГУЛИНСКОГО МАССИВА (МАЙМЕЧА-КОТУЙСКАЯ ПРОВИНЦИЯ, РОССИЯ): ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ

© 2022 г. К. Н. Малич[1,*], академик РАН Л. Н. Когарко[2,**], И. Ю. Баданина[1], Т. А. Веливецкая[3,***], А. В. Игнатьев[3]

Поступило 29.08.2022 г.
После доработки 05.09.2022 г.
Принято к публикации 07.09.2022 г.

С целью идентификации источника серы впервые охарактеризованы особенности химического и S-изотопного состава Ru–Os-сульфидов в составе полифазных минеральных ассоциаций платиноидов из четвертичных отложений Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами Маймеча-Котуйской провинции. Для исследования Ru–Os-сульфидов и сосуществующих с ними минералов платиновой группы был применен комплекс методов, включающий рентгеноспектральный микроанализ, лазерную абляцию с масс-спектрометрическим окончанием. Полифазные минеральные ассоциации представлены двумя типами: 1) минералами осмия и иридия, Ru–Os-сульфидами изоморфного ряда лаурит (RuS_2)–эрликманит (OsS_2), купроиридситом ($CuIr_2S_4$) и неназванным Os–Ir-сульфидом $(Os,Ir)S_2$, 2) железистой платиной с включениями лаурита, Os–Ru–Ir-сплавов и других минералов платиновой группы. Коренными источниками полиминеральной ассоциации платиноидов первого типа являются дуниты и хромититы, второй – клинопироксениты. Близкие к нулю значения величин $\delta^{34}S$ Ru–Os-сульфидов первого типа (0.9 ± 0.4‰, n = 8) не противоречат предположению о мантийном источнике серы. Незначительное облегчение изотопного состава серы в лаурите второго типа ($\delta^{34}S$ = –1.7 ± 0.2‰, n = 10), вероятно, обусловлено эволюцией состава рудообразующего флюида. Изотопный состав серы изученных Ru–Os-сульфидов обоих типов может указывать на ее субхондритовый источник.

Ключевые слова: Ru–Os-сульфиды, лаурит, эрликманит, изотопный состав серы, субхондритовый источник, Гулинский массив, Маймеча-Котуйская провинция

DOI: 10.31857/S2686739722601752

ВВЕДЕНИЕ

Изотопы серы являются важными индикаторами мантийных, магматических, метаморфических, осадочных, гидротермальных и биологических процессов на Земле и в Солнечной системе [1]. Начиная с исследования [2], изотопный состав серы мантии Земли считается однородным со средним значением $\delta^{34}S$, равным 0‰, неотличимым от хондритового ($\delta^{34}S$ = 0.04 ± 0.31‰ [3]). Данные по изотопному составу серы сульфидов являются важным инструментом для выявления контаминации первичных магм при их взаимодействии с породами земной коры. Предполагается, что значения, выходящие за пределы 0 ± 2‰, являются следствием процессов корово-мантийного взаимодействия (при вкладе коровой серы) как в условиях мантии, так и при становлении мантийных магм в коровых условиях [4]. Возможность использования изотопного состава серы с целью идентификации источника рудного вещества Ru–Os-сульфидов была апробирована на примере дунит-гарцбургитовых массивов офиолитовой ассоциации ([5, 6] и др.). Для Ru–Os-сульфидов из других геологических обстановок подобные исследования не известны. Чтобы частично восполнить данный пробел в нашем сообщении, впервые обсуждаются результаты химического и S-изотопного состава Ru–Os-сульфидов в составе полифазных ассоциаций минералов

[1]*Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*
[2]*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия*
[3]*Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*
**E-mail: dunite@yandex.ru*
***E-mail: kogarko@geokhi.ru*
****E-mail: velivetskaya@mail.ru*

платиновой группы (МПГ) Гулинского массива на севере Сибирской платформы в пределах Маймеча-Котуйской провинции [7, 8].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СОСТАВ РОССЫПЕОБРАЗУЮЩИХ МПГ И ИЗУЧЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ

Гулинский массив ультраосновных, щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов обнаружен Ю.М. Шейнманном и П.С. Фоминым в 1943 г. Он контролируется Таймыро-Байкальской и Енисей-Котуйской палеорифтогенными структурами. По геолого-геофизическим данным площадь Гулинского массива вместе с погребенной частью составляет около 2000 км^2. Форма ультрамафитового тела по данным математического моделирования материалов гравиразведки и данным бурения пластинообразная [8] с погружением на северо-запад, в плане близкая эллипсу, длинная ось которого вытянута в северо-восточном направлении.

В обнаженной части массив сложен, главным образом, дунитами, хромититами, верлитами и клинопироксенитами в составе гулинского клинопироксенит-дунитового комплекса (рис. 1). Преобладающие дуниты образуют в плане серповидное тело протяженностью около 30 км и шириной 10–15 км, занимая площадь около 450 кв. км (рис. 1). В юго-западной части они перекрыты толщей меймечитов – ультраосновных вулканитов маймечинской свиты, а в центральной – прорваны штокообразными телами маймеча-котуйского ийолит-карбонатитового комплекса площадью около 30 км^2 (рис. 1). По данным Л.Н. Когарко и Р.Е. Зартмана [9] $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{238}U/^{204}Pb$-возраст пород Гулинского массива составляет 250.0 ± 8.7 млн лет, что свидетельствует об их синхронности с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (248.7 ± 0.6–250.3 ± ± 1.1 млн лет [10]).

Выявленный ([11] и др.) уровень и характер распределения элементов платиновой группы (ЭПГ) в ультраосновных породах позволил установить, что в дунитах и приуроченных к ним хромититах ведущими являются тугоплавкие платиноиды Ir-группы (Os, Ir и Ru), которые преобладают над легкоплавкими платиноидами Pt-группы (Rh, Pt и Pd). Клинопироксениты обладают платино-палладиевой специализацией. Уникальность связанных с Гулинским массивом золото-платиноидных россыпей определяется выявленными минеральными парагенезисами платиноидов, а также значительными прогнозными ресурсами (первые десятки тонн) благородных металлов и, в частности, осмия, соизмеримыми с имеющими промышленную значимость месторождениями Витватерсрандского бассейна Южной Африки ([11] и др.).

Подавляющее большинство МПГ из россыпей Гулинского массива образованы преимущественно субидиоморфными и идиоморфными кристаллами, а также агрегатами кристаллов, представленных Os–(Ir–Ru)-твердыми растворами или минералами осмия. В резко подчиненном количестве выявлены два типа полиминеральных ассоциаций, состоящих из: 1) минералов осмия и иридия, Ru–Os-сульфидов изоморфного ряда лаурит (RuS_2)–эрликманит (OsS_2), купроиридсита ($CuIr_2S_4$) или неназванного Os–Ir-дисульфида [12] и 2) железистой платины с включениями лаурита (RuS_2), Os–Ru–Ir-сплавов, мончеита ($PtTe_2$), маланита ($CuPt_2S_4$) и некоторых других МПГ [13].

Выбранные для исследования образцы Ru–Os-сульфидов в составе полиминеральных агрегатов МПГ были взяты из: 1) четвертичных отложений верхнего течения р. Ингарингда (поисковая линия 365) и 2) ручья Бурлаковский (поисковая линия 2), левого притока р. Ингарингда (рис. 1, врезка).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования морфологии и химического состава МПГ были использованы сканирующая микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ (СЭМ JSM-6390L, “Jeol” с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80, “Oxford Instruments”, CAMECA SX 100, ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (Екатеринбург), дооснащение и комплексное развитие которого осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-680)). При проведении количественных анализов были использованы следующие рентгеновские спектральные линии и стандартные образцы: OsMα, IrLα, RuLα, RhLα, PtLα, PdLß, NiKα (все чистые металлы), FeKα, CuKα, SKα (халькопирит), AsLα – сплав InAs; проведен учет спектральных наложений линий (RuLα на AsLα; RuLβ на RhLα; IrLα на CuKα и др.). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, сила тока пучка электронов – 20 нА, диаметр точки анализа 1–2 мкм. Изотопный состав серы в 18 образцах Ru–Os-сульфидов был изучен с помощью системы лазерной фемтосекундной абляции (NWR Femtosecond UC with laser Pharos 2mJ-200–PPam and harmonics module HE–4Hi–A) и масс-спектрометра MAT–253 “Thermo Fisher Scientific” (Germany) в ЦКП “Приморский центр локального элементного и изотопного анализа” ДВГИ ДВО РАН (Владивосток) по методике, приведенной в работах [14, 15]). При абляции Ru–Os-сульфидов с пространственным разрешением 80–100 мкм формировался аэрозоль, который потоком He выносился из ка-

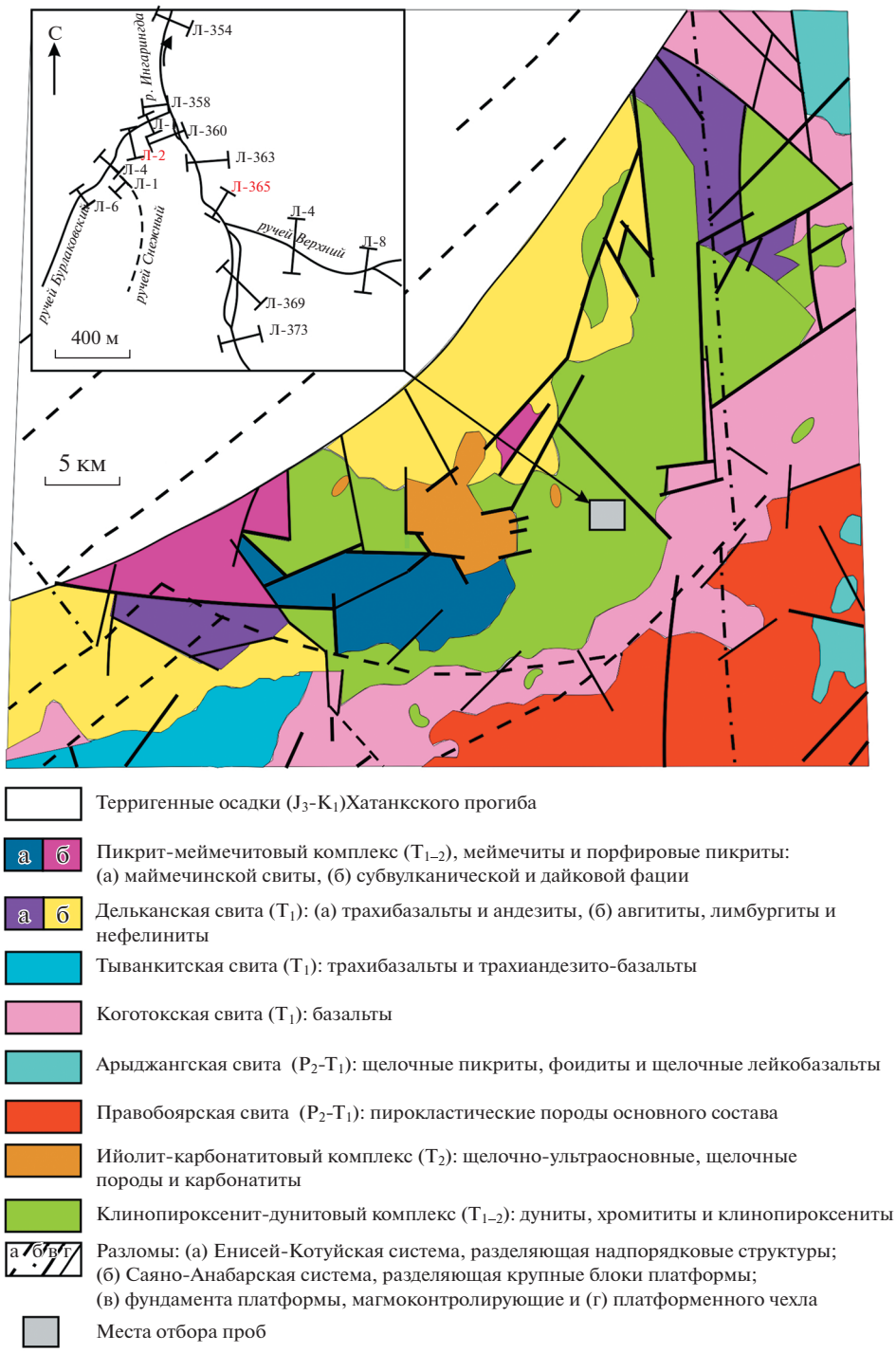

Рис. 1. Схемы расположения образцов (врезка) и геологического строения Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами по [8]. На врезке красным цветом отмечены поисковые линии (Л-365 р. Ингарингда и Л-2 руч. Бурлаковский), из которых взяты образцы МПГ.

меры в реактор и конвертировался в SF_6 в реакции с BrF_5. После этого криогенно и хроматографически очищенный SF_6 в потоке He поступал в интерфейс, который обеспечивал измерение ионных токов, соответствующих массам 127 ($^{32}SF_5^+$) и 129 ($^{34}SF_5^+$) в высоковакуумном режиме работы масс-спектрометра. Измерения проведены относительно рабочего стандарта, калиброванного в шкале VCDT по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3. Результаты измерений изотопного состава серы представлены

Таблица 1. Химический и S-изотопный состав Ru–Os-сульфидов Гулинского массива

№ п/п	Минерал	Мас. %					Ат. %				Ru#	$\delta^{34}S$, ‰
		Ru	Os	Ir	S	Сумма	Ru	Os	Ir	S		
Ru-Os-сульфиды из полифазных агрегатов МПГ первого типа												
1	Лаурит	36.11	27.91	2.33	33.57	99.92	22.85	9.39	0.78	66.98	71	1.0
2	Лаурит	50.35	11.95	1.53	36.26	100.09	29.30	3.70	0.47	66.53	89	1.1
3	Лаурит	23.94	40.23	4.76	30.57	99.50	26.67	4.92	1.71	66.70	53	1.2
4	Лаурит	30.28	31.48	5.59	32.42	99.77	19.90	11.00	1.93	67.17	64	1.3
5	Эрликманит	5.37	62.92	5.38	26.39	100.06	4.30	26.78	2.27	66.65	14	1.2
6	Лаурит	23.99	40.62	4.55	30.65	99.81	16.59	14.93	1.65	66.83	53	0.3
7	Эрликманит	9.97	53.64	8.46	27.44	99.51	7.70	22.02	3.44	66.84	26	1.0
8	Лаурит	35.99	25.99	3.68	33.37	99.03	22.94	8.80	1.23	67.03	72	0.3
Среднее (n = 8)												0.9
Ru–Os-сульфиды из полифазных агрегатов МПГ второго типа												
9	Лаурит	55.28	4.47	2.45	37.41	99.61	31.25	1.34	0.73	66.68	96	–1.6
10	Лаурит	55.87	3.69	2.36	37.53	99.45	31.50	1.10	0.70	66.70	97	–1.8
11	Лаурит	57.91	2.71	1.66	38.21	100.49	32.05	0.80	0.48	66.67	98	–1.6
12	Лаурит	58.68	1.24	1.08	38.14	99.14	32.57	0.37	0.32	66.74	99	–1.7
13	Лаурит	58.60	2.74	0.23	38.47	100.04	32.29	0.80	0.07	66.84	98	–1.7
14	Лаурит	59.79	1.09	0.25	38.80	99.93	32.70	0.32	0.07	66.91	99	–1.4
15	Лаурит	55.30	5.97	0.75	38.01	100.03	30.95	1.77	0.22	67.06	95	–1.6
16	Лаурит	57.86	2.94	0.76	38.31	99.87	32.04	0.87	0.22	66.87	98	–1.6
17	Лаурит	57.49	3.78	0.41	38.20	99.88	31.91	1.12	0.12	66.85	97	–2.2
18	Лаурит	55.46	6.07	0.68	38.01	100.22	31.01	1.80	0.20	66.99	95	–1.5
Среднее (n = 10)												–1.7

Примечание. Ru# = $100*Ru_{ат\ \%}/(Os + Ru)_{ат\ \%}$.

относительно международного стандарта VCDT по формуле $\delta^{34}S(‰) = \{[(^{34}S/^{32}S)$образца–$(^{34}S/^{32}S)$стандарт$]/(^{34}S/^{32}S)$стандарт$\} \times 1000$. Точность определения $\delta^{34}S$ составляла ± 0.2‰ (σ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ru–Os-сульфиды из полиминеральных агрегатов первого типа характеризуются кристаллическими индивидами размером от 0.15 до 1.5 мм (рис. 2 а–в). По составу они соответствуют лауриту и эрликманиту, образующим непрерывный ряд твердых растворов (табл. 1, ан. 1–8, рис. 3, Ru # варьирует от 14 до 89). Кроме Ru, Os и S данные минералы содержат значимые концентрации Ir (1.53–8.46 мас. %). Данный тренд составов соответствует таковому для минералов серии лаурит–эрликманит из подиформных хромититов ([16] и др.). Os–Ir-сплавы в составе полиминеральных агрегатов первого типа представлены самородным осмием и Ir-содержащим осмием. Для данной ассоциации МПГ характерно наличие высокомагнезиального оливина ($Fo_{88–93}$) в составе минеральных включений в Os–Ir-сплавах и в межзерновом пространстве между Ru–Os-сульфидами и Os–Ir-сплавами (рис. 2 а, б). Значения $\delta^{34}S$ в Ru–Os-сульфидах первого типа варьируют в пределах от 0.3 до 1.3‰ и характеризуются средним значением $\delta^{34}S$ = 0.9‰ при среднеквадратичном отклонении, равном 0.4‰ (табл. 1, рис. 4).

Ru–Os-сульфиды из полиминеральных агрегатов второго типа образованы идиоморфными минеральными включениями размером от 30 до 400 мкм в железистой платине (рис. 2 г–и). По сравнению с Ru–Os-сульфидами из полиминеральных агрегатов первого типа они характеризуются значительно более рутениевым составом (рис. 3, табл. 1, ан. 9–18, Ru # 95–99), который соответствует лауриту, содержащему незначительные концентрации Os (1.09–6.07 мас. %) и Ir (0.23–2.45 мас. %). Химический состав железоплатиновых сплавов, как правило, близок к стехиометрии Pt_2Fe (где Pt равна сумме ат. % ЭПГ, Fe – сумме ат. % железа, меди и никеля). Значения $\delta^{34}S$ в лаурите варьируют в незначительных пределах – от –2.2 до –1.4‰ (среднее значение

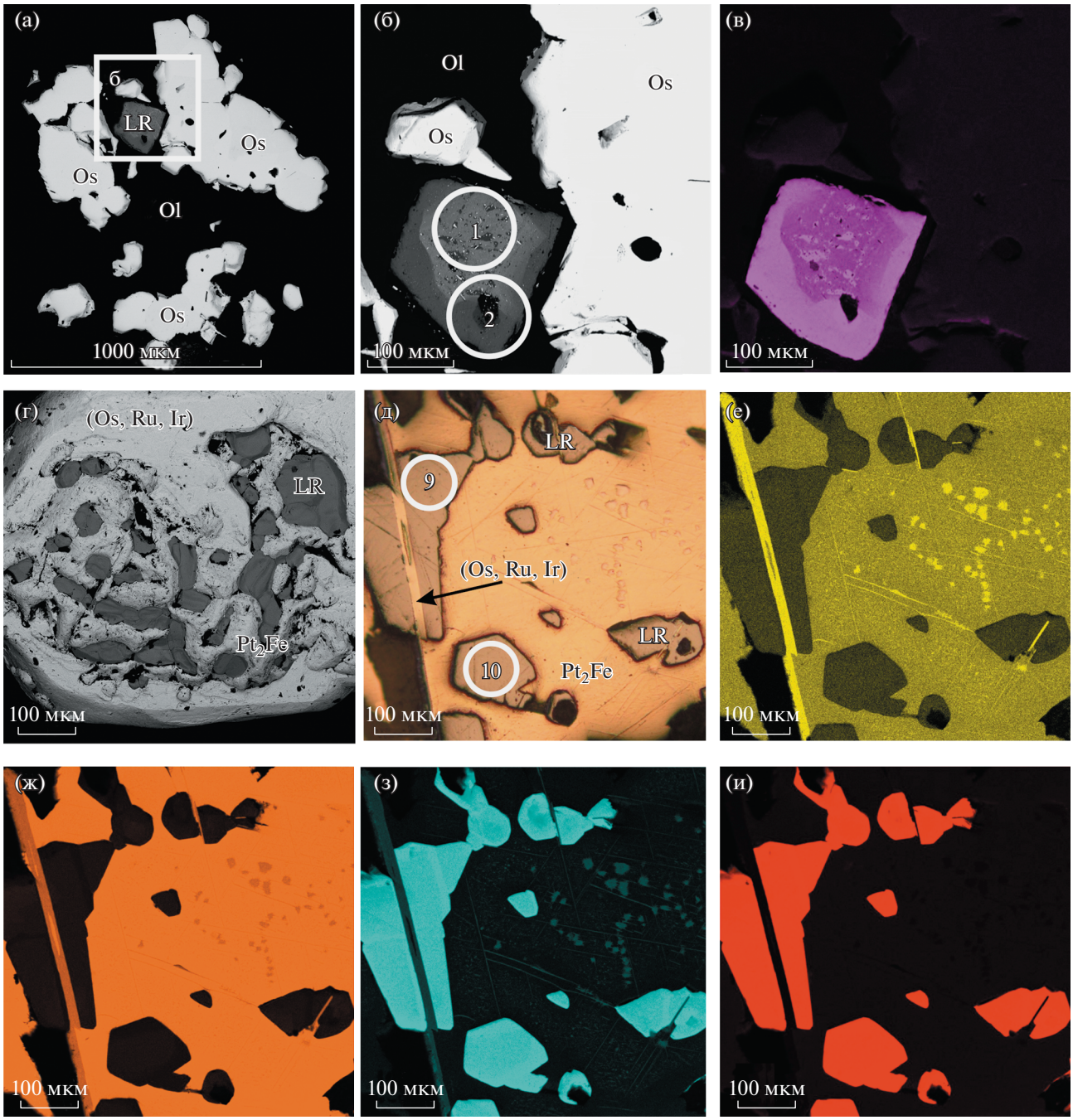

Рис. 2. Типичные особенности морфологии и внутреннего строения Ru–Os-сульфидов в составе полиминеральных агрегатов МПГ первого (а–в, обр. 58–5) и второго (г–и, обр. 60–1) типа. Изображения в обратно-рассеянных электронах с вещественным контрастом (а, общий вид, б, г, д – детали), в отраженном свете (д), в рентгеновских лучах RuLα (в, з), IrLα (е), PtMα (ж), SKα (и). Цифры на рис. б и д – участки проведения изотопных анализов серы, соответствующие таковым номерам в табл. 1. Круги соответствуют местам отбора пробы для S-изотопного анализа. LR – лаурит, Os – осмий, (Os, Ru, Ir) – сплав Ru–Ir-содержащего осмия, Pt_2Fe – железистая платина, Ol – оливин.

равно –1.7‰ при среднеквадратичном отклонении 0.2‰, $n = 10$, табл. 1, рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокотемпературная природа образования Ru–Os сульфидов была подтверждена экспериментально [17]. Верхняя термальная стабильность лаурита оказалась равной 1200–1250°C при $f(S_2) = 10^{-1}$ атм; при этом минеральная ассоциация лаурита и Os–Ir-сплава оказалась устойчивой в интервале температур 1200–1250°C и активности серы $f(S_2)$ $10^{-0.39}$–$10^{-0.07}$ атм [17]. При увеличении

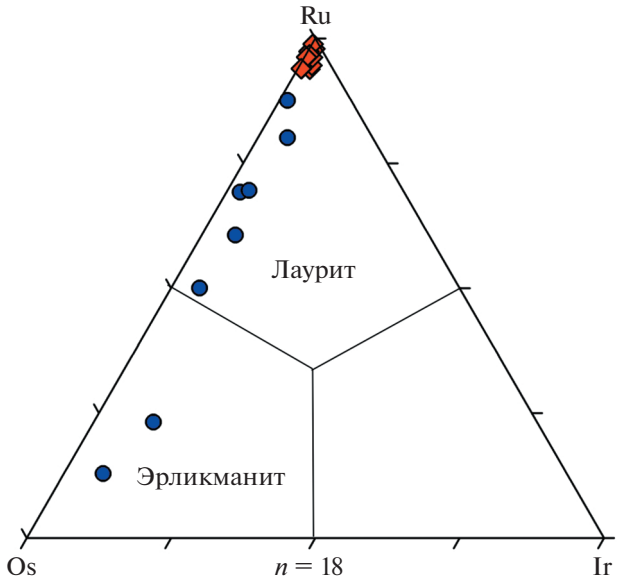

Рис. 3. Химический состав Ru–Os-сульфидов из полифазных агрегатов МПГ первого (круги синего цвета) и второго (треугольники красного цвета) типа в координатах Ru–Os–Ir, ат. %.

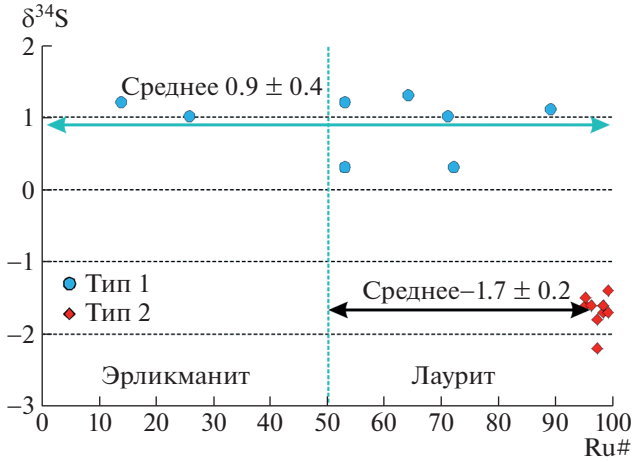

Рис. 4. Изотопный состав серы ($\delta^{34}S$, ‰) Ru–Os-сульфидов в составе полиминеральных ассоциаций платиноидов первого (круги синего цвета) и второго (треугольники красного цвета) типа.

активности серы составы лаурита и Os–Ir-сплава приближаются к таковым природных полиминеральных ассоциаций Гулинского массива, что подтверждает совместную равновесную кристаллизацию данных МПГ. Высокотемпературная природа Ru–Os-сульфидов из полифазных агрегатов МПГ первого типа подтверждается присутствием в них высокомагнезиального оливина, попадающего в диапазон составов мантийного оливина ($Fo_{88–93}$).

Новые данные по изотопному составу серы Ru–Os-сульфидов первого типа ($\delta^{34}S$ = 0.9 ± 0.4‰) идентичны таковым в Ru–Os-сульфидах из россыпей Борнео ($\delta^{34}S$ = 1.2 ± 0.4‰ [5]) и Верх-Нейвинского массива ($\delta^{34}S$ = 2.0 ± 0.9‰ [6]). В обоих случаях Ru–Os-сульфиды пространственно связаны с мантийными разрезами дунит-гарцбургитовых массивов офиолитовой ассоциации. Вариации изотопного состава серы лаурита второго типа ($\delta^{34}S$ = –1.7 ± 0.2‰) оказались близки к таковым сульфидов малосульфидного платиноидного месторождения “баронского типа” ($\delta^{34}S$ от –2.6 до –1.2‰ [18]), приуроченных к клинопироксенитам Волковского массива на Среднем Урале.

Выявленные минералого-геохимические параметры фракционирования ЭПГ в ультрамафитах Гулинского массива [11] позволили обосновать вывод о коренных источниках МПГ, где Os–Ir-сплавы и Ru–Os-сульфиды характерны для дунитов и хромититов, Pt–Fe-интерметаллиды – для клинопироксенитов. В данном контексте незначительное облегчение изотопного состава серы лаурита в ассоциации с железистой платиной по сравнению с таковым в лаурите и эрликманите в полиминеральных агрегатах с Os–Ir-минералами ($\delta^{34}S$ = –1.7 ± 0.2‰, n = 10 и $\delta^{34}S$ = 0.9 ± 0.4‰, n = 8 соответственно) может быть связано с фракционированием изотопов серы в результате ее частичного окисления при формировании МПГ клинопироксенитов, образовавшихся позднее дунитов Гулинского массива. Отметим, что роль и источник рудообразующих флюидов, а также условия, при которых ЭПГ Ir-группы (Os, Ir и Ru) мобильны, являются предметом дискуссии. Допускается, что тугоплавкие ЭПГ могут быть мобилизованы из мантийных реститов окисленными флюидами, переноситься в виде газообразных оксидов (Os) или хлоридов (Ru) при высоких температурах и низкой летучести серы и осаждаться при падении значений f(HCl) и/или $f(O_2)$, и увеличении $f(S_2)$ или $f(H_2O)$ ([19, 20] и др.).

Полученные нами ранее Sr–Nd-изотопные данные ($^{87}Sr/^{86}Sr_{(250\ млн\ лет)}$ 0.7031–0.7038, $\varepsilon Nd_{(250\ млн\ лет)}$ 3.97–5.35 [9]) вместе с нерадиогенным изотопным составом Pb ($^{206}Pb/^{204}Pb$ 17.88–18.31; $^{207}Pb/^{204}Pb$ 15.38–15.46; $^{208}Pb/^{204}Pb$ 37.33–37.70 [9]) для пород Гулинского массива свидетельствуют об участии вещества деплетированной мантии при их магмогенерации. Обоснование о глубинном источнике серы согласуется с результатами изучения изотопной систематики осмия в сосуществующих Ru–Os-сульфидах и Os–Ir-сплавах Гулинского массива [12]. Действительно, начальный изотопный состав осмия Ru–Os-сульфидов и Os–Ir-сплавов характеризуется идентичными значениями $^{187}Os/^{188}Os$ = 0.1245 ± 0.0002 (n = 12)

при величине $\gamma Os_{(250\ млн\ лет)} = -0.67$. Таким образом, выявленные особенности изотопного состава осмия и серы Ru–Os-сульфидов Гулинского массива свидетельствуют в пользу субхондритового источника рудного вещества.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.А. Булатову, В.В. Хиллер и Н.С. Чебыкину за помощь при проведении минералогических исследований. Авторы признательны анонимному рецензенту за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-00140.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Seal R.R.* Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2006. V. 61. P. 633–677.
2. *Thode H., Monster J., Dunford H.* Sulphur isotope geochemistry // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1961. V. 25 P. 159–174.
3. *Gao X., Thiemens M.H.* Variations in the isotopic composition of sulfur in enstatite and ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. V. 57. P. 3171–3176.
4. *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.
5. *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.
6. *Malitch K.N., Badanina I.Yu., Belousova E.A., Murzin V.V., Velivetskaya T.A.* Origin of Ru-Os sulfides from the Verkh-Neivinsk ophiolite massif (Middle Urals, Russia): Compositional and S–Os isotope evidence // Minerals. 2021. V. 11. № 3. P. 329. https://doi.org/10.3390/min11030329
7. *Kogarko L.N., Kononova V.A., Orlova M.P., Wooley A.R.* Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Pt 2: Former USSR. L.: Chapman and Hall, 1995. 226 p.
8. *Малич К.Н., Лопатин Г.Г.* Новые данные о металлогении уникального Гулинского клинопироксенит-дунитового массива (Северная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 3. С. 247–257.
9. *Kogarko L.N., Zartman R.E.* A Pb isotope investigation of the Guli massif, Maymecha-Kotuy alkaline-ultramafic complex, Siberian flood basalt province, Polar Siberia // Mineralogy and Petrology. 2007. V. 89. P. 113–132.
10. *Reichow M.K., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D.* The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // Earth and Planetary Science Letters. 2009. V. 277. P. 9–20.
11. *Малич К.Н.* Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). С-Пб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1999. 296 с.
12. *Malitch K.N., Auge T., Badanina I.Yu., Goncharov M.M., Junk S.A., Pernicka E.* Os-rich nuggets from Au-PGE placers of the Maimecha-Kotui Province, Russia: a multi-disciplinary study // Mineralogy and Petrology. 2002. V. 76. P. 121–148.
13. *Malitch K.N., Thalhammer O.A.R.* Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: a structural, compositional and osmium-isotope study // Canadian Mineralogist. 2002. V. 40. P. 395–418.
14. *Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А.* Новый локальный метод для определения изотопного состава серы в сульфидах с использованием изотопного масс-спектрометра с лазерной абляцией // Масс-спектрометрия. 2013. Т. 10. № 4. С. 255–263.
15. *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.
16. *Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpfl E.F.* Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhastan: a study of solid and fluid inclusions in chromite // Journal of Petrology. 1997. V. 38. P. 1419–1458.
17. *Andrews D.R.A., Brenan J.M.* Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite and Os-Ir alloy // Canadian Mineralogist. 2002. V. 40. P. 1705–1716.
18. *Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T.* The gold-palladium Ozernoe occurrence (Polar Urals, Russia): mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid // Minerals. 2022. V. 12. P. 765. https://doi.org/10.3390/min12060765
19. *Wood S.A.* Thermodynamic calculations of the volatility of the platinum group elements (PGE): the PGE content of fluids at magmatic temperatures // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1987. V. 51. P. 3041–3050.
20. *Wood S.A.* The aqueous geochemistry of the platinum group elements with applications to ore deposits // The geology, geochemistry, mineralogy and beneficiation of the platinum-group elements (Cabri L.J. ed.). Special volume 54. Canadian institute of mining, metallurgy and petroleum. 2002. P. 211–249.

SULFUR ISOTOPE COMPOSITION OF Ru–Os SULFIDES FROM THE GULI MASSIF, MAIMECHA-KOTUI PROVINCE, RUSSIA: FIRST RESULTS

K. N. Malitch[a,#], Academician of the RAS L. N. Kogarko[b,##], I. Yu. Badanina[a], T. A. Velivetskaya[c,###], and A. V. Ignatiev[c]

[a]*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation*

[b]*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[c]*Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: dunite@yandex.ru*

[##]*E-mail: kogarko@geokhi.ru*

[###]*E-mail: velivetskaya@mail.ru*

To gain further insight into the origin of Ru–Os sulfides, this study presents the first in-situ sulfur isotopic data for Ru–Os sulfides from different polyphase platinum-group mineral (PGM) assemblages derived from the Quaternary deposits of the Guli massif located in the Maimecha-Kotui province. The study utilized a number of analytical techniques, including electron microprobe analysis and laser ablation attached to multiple collector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Polyphase platinum-group mineral (PGM) assemblages are represented by two types: 1) osmium and iridium alloys associated with Ru–Os sulfides of the laurite $(Ru,Os)S_2$ – erlichmanite $(Os,Ru)S_2$ solid solution series, cuproiridsite ($CuIr_2S_4$), and unnamed Os–Ir sulfide $(Os,Ir)S_2$, 2) ferroan platinum containing inclusions of laurite, Ru–Os–Ir alloys and other PGMs. These detrital PGM assemblages were sourced from different bedrocks. It is concluded that PGM assemblages of type 1 and 2 were derived from dunite/chromitite and clinopyroxenite, respectively. The sulfur isotope signatures of Ru–Os sulfides of type 1 ($\delta^{34}S = 0.9 \pm 0.4‰$, $n = 8$) imply that sulfur derived from a subchondritic source. Slightly lighter $\delta^{34}S$ values in type 2 laurite ($\delta^{34}S = -1.7 \pm 0.2‰$, $n = 10$) are likely due to the evolved composition of the ore-forming fluid. Despite these differences, the S-isotope data are consistent with the origin of sulfur from a common near-chondritic source.

Keywords: Ru–Os sulfides, laurite, erlichmanite, sulfur isotope composition, near-chondritic source, Guli massif, Maimecha-Kotui province