

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.42(571.51)

**Pt-Re-Os ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ХРОМИТИТОВ
И МИНЕРАЛОВ ОСМИЯ ГУЛИНСКОГО МАССИВА
(МАЙМЕЧА-КОТУЙСКАЯ ПРОВИНЦИЯ, РОССИЯ)**

© 2024 г. К. Н. Малич^{1,*}, И. С. Пухтель^{2,**},
академик РАН Л. Н. Когарко^{3,***}, И. Ю. Баданина¹

Поступило 18.10.2023 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принято к публикации 23.11.2023 г.

С целью идентификации источника рудного вещества впервые охарактеризованы Re–Os- и Pt–Os-изотопные вариации и содержания сильно сидерофильных элементов (ССЭ) в хромититах и минералах осмия Гулинского массива ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами Маймеча-Котуйской провинции Полярной Сибири. При проведении исследований был применен комплекс методов, включающий рентгеноспектральный микроанализ, термоионизационную масс-спектрометрию в отрицательных ионах (N-TIMS) и масс-спектрометрию с использованием изотопного разбавления и ионизацией пробы в индуктивно-связанной плазме (ID-ICP-MS) после разложения образцов при высоком давлении. Концентрации ССЭ в образцах хромититов варьируют в пределах 191–866 мг/т с преобладанием платиноидов Iг-группы (Os, Iг и Ru) над платиноидами Pt-группы (Rh, Pt и Pd) и Re, что согласуется с минеральной формой их нахождения в Os–Iг-сплавах и лаурите (RuS₂). Высокоточные Re–Os- и Pt–Os-изотопные данные свидетельствуют о том, что содержания сильно сидерофильных элементов в хромититах и минералах осмия Гулинского массива в значительной степени контролировались составом мантийного источника, который эволюционировал с околохондритовыми интегрированными по времени Re/Os- и Pt/Os-отношениями, характерными также для источников большинства коматитов и абиссальных перидотитов.

Ключевые слова: сильно сидерофильные элементы, минералы осмия, хромититы, Re–Os- и Pt–Os-изотопные системы, мантийный источник, Гулинский массив, Маймеча-Котуйская провинция

DOI: 10.31857/S2686739724030062

ВВЕДЕНИЕ

Для выявления изотопно-геохимических параметров рудного вещества платинометаллических месторождений нередко используются изотопные системы, основанные на α -распаде ¹⁹⁰Pt с образованием ¹⁸⁶Os ($T_{1/2} = 469$ млрд лет [1]) и β -распаде ¹⁸⁷Re с образованием ¹⁸⁷Os ($T_{1/2} = 41.6$ млрд лет [2]). Эти системы нашли широкое применение

при оценке эволюции Pt/Os- и Re/Os-отношений в мантийных источниках и временных ограничений на плавление мантийных производных в различных геологических обстановках ([3–9] и др.). В отличие от стронция, неодима, гафния и свинца, являющихся элементами, “несовместимыми” с магматическим расплавом, осмий ведет себя как элемент “совместимый”, при плавлении мантии накапливающийся в перидотитовом остатке (мантийном рестите). Рений, и в меньшей степени платина, перераспределяются в расплав. Сильные различия в степени совместимости по отношению к расплаву между Pt, Re и Os определяют значительное преимущество Pt–Os- и Re–Os-изотопных систем перед Sm–Nd-, Lu–Hf-, U–Pb- и Rb–Sr-изотопными системами, дочерние и материнские элементы в которых слабо фракционируют при плавлении мантии. Таким образом, Pt–Os- и Re–Os-системы представляют уникальную геохимическую информацию

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

²Университет Мэрлэнда, Колледж Парк, MD20742, США

³Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской Академии наук, Москва

*E-mail: dunite@yandex.ru

**E-mail: ipuchtel@umd.edu

***E-mail: kogarko@geokhi.ru

о составе мантийного протолита и эволюции продуктов его плавления. В отличие от Re–Os-изотопных данных, Pt–Os-изотопная систематика платинометаллических месторождений до сих пор остается слабо изученной [6, 7]. Чтобы частично восполнить данный пробел, нами выполнено комплексное минералогическое и изотопно-геохимическое исследование, включающее определение содержаний сильно сидерофильных элементов (ССЭ: Re, Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd), и Re–Os- и Pt–Os-изотопии в хромититах и минералах осмия из россыпного месторождения Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции на севере Сибирской платформы. Это исследование является частью более масштабной задачи по выявлению источников рудного вещества и происхождения благороднометаллических месторождений складчатых областей и платформ.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗУЧЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ

С уникальным Гулинским массивом ультраосновных и щелочных пород с карбонатитами в Полярной Сибири связаны крупные россыпные месторождения осмия и иридия с мелкими россыпями золота [10, 11]. Ультрамафиты и платиноидная минерализация Гулинского массива обладают чертами сходства с таковыми платиноносных клинопироксенит-дунитовых массивов Алдана, Урала, Дальнего Востока, Аляски, Британской Колумбии, Восточной Австралии и офиолитовых дунит-гарцбургитовых массивов Урала, Корякии, Тасмании и Новой Каледонии. С первыми их сближает парагенетическая ассоциация пород (дуниты, хромититы, верлиты и клинопироксениты) и значительный россыпеобразующий потенциал (первые десятки тонн полезного компонента), а со вторыми – большой площадной размер коренных выходов ультрамафитов (сотни км²) и металлогеническая специализация на платиноиды Ir-группы (Os,

Ir, Ru). По данным Л.Н. Когарко и Р.Е. Зартмана [12], Pb–Pb-возраст пород Гулинского массива составляет 250.0 ± 8.7 млн лет.

Выполненное исследование базируется на образцах (1) хромититов с подиформным характером залегания в дунитах (рис. 1 а), выявленных в истоках р. Ингарингда в южной части Гулинского массива (обр. G-3, G-5, G-40), и (2) минералов осмия из четвертичных отложений верхнего течения р. Ингарингда (поисковая линия 369, обр. 7–71) и ручья Бурлаковский (поисковая линия 2, обр. 67), левого притока р. Ингарингда, расположенных в южной части массива (рис. 1 в [13]).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования морфологии и химического состава минералов платиновой группы (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, аналитики С.П. Главатских, В.В. Хиллер). При проведении количественных анализов были использованы следующие рентгеновские спектральные линии и стандартные образцы: OsMα, IrLα, RuLα, RhLα, PtLα, PdLβ, 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, длительность измерения интенсивности на пике – 10 с, на фоне – по 5 с, диаметр точки анализа – 1–2 мкм. Определение ЭПГ, рения и изотопного состава осмия в образцах хромититов Гулинского массива (обр. G-3, G-5, G-86) выполнено в Горном Университета Леобена (Австрия) с помощью масс-спектрометрии

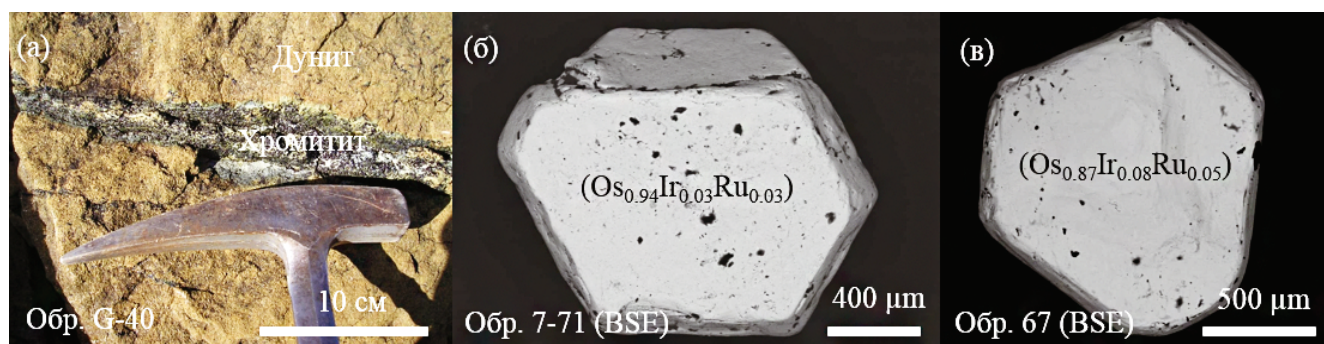


Рис. 1. Морфологические особенности: (а) прожилкового хромитита (обр. G-40) Гулинского массива, (б, в) кристаллов самородного осмия из четвертичных отложений (обр. 7–71 и 67 соответственно) Гулинского массива. Изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE) с вещественным контрастом (б, в).

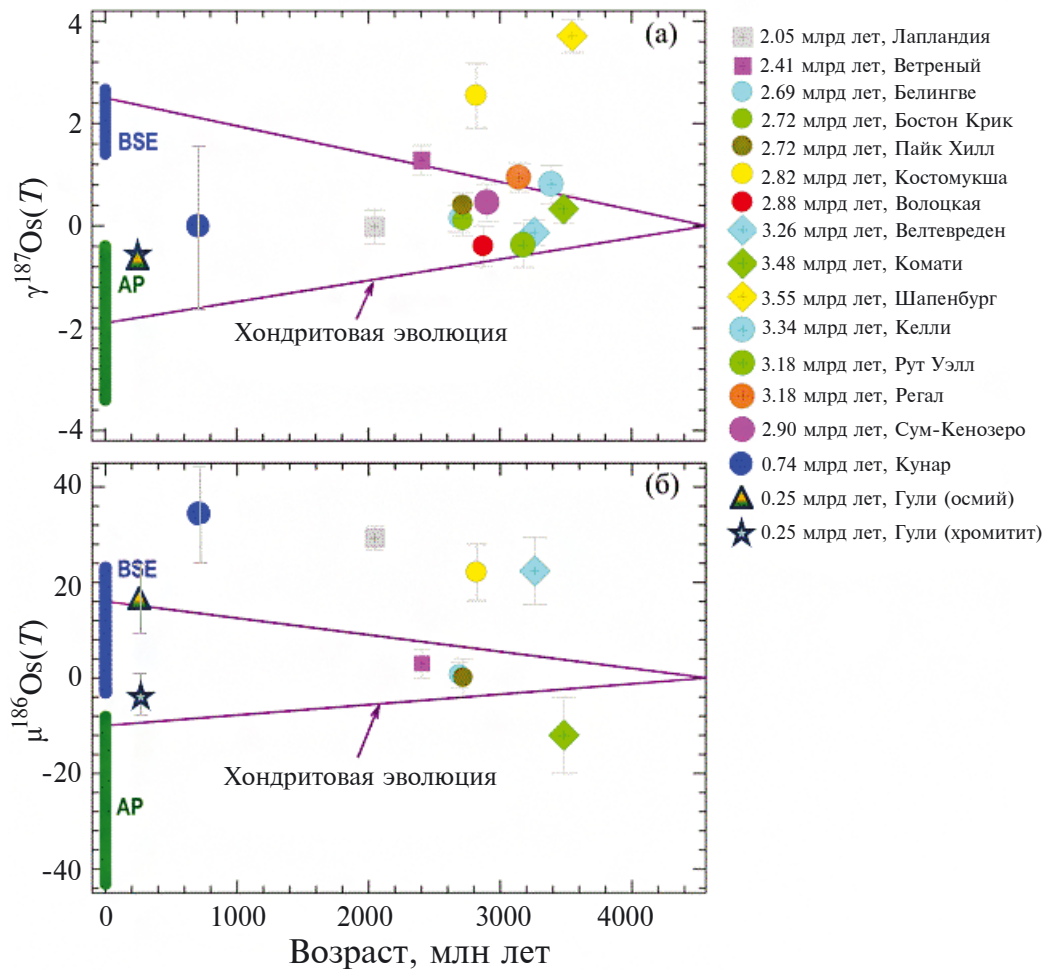


Рис. 2. Диаграмма вариаций (а) начальных $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -изотопных составов, выраженных в величинах $\gamma^{187}\text{Os}(T)$, и (б) начальных $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -изотопных составов, выраженных в величинах $\mu^{186}\text{Os}(T)$, для хромитита, минералов осмия Гулинского массива, МПГ Кунарского комплекса и докембрийских комаитовых массивов, относительно их возраста. Данные по комаититам по [9], по МПГ Кунарского комплекса по [8]. Синяя вертикальная полоса для современной Валовой Силикатной Земли (Bulk Silicate Earth: BSE) по [4] для (а) и по [7] для (б). Os-изотопные данные для абиссальных перидотитов (Abyssal Peridotite: AP) взяты из [3, 7], для хондритовых метеоритов – из [6, 19, 20]; последние представлены в виде сегмента, заключенного между двумя фиолетовыми сходящимися наклонными линиями и отвечают их полному диапазону вариаций современных значений величин $\gamma^{187}\text{Os}$, спроецированных во времени к первичному отношению $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ для Солнечной системы. Все погрешности отвечают 2SD от среднего значения.

с использованием изотопного разбавления и ионизации пробы в индуктивно-связанной плазме (ID-ICP-MS) после разложения образцов при высоком давлении. Более подробная характеристика данного аналитического метода приведена в работе [14]. Один образец хромитита (обр. G-40) был проанализирован на содержание ЭПГ и рения, с одновременным анализом изотопного состава осмия и платины в изотопно-геохимической лаборатории (Isotope Geochemical Laboratory, IGL) Университета Штата Мэриленд, США. Re–Os- и Pt–Os-изотопные составы для образцов хромитита (обр. G-40) и минералов осмия (обр. 67

и 7-71) были определены с помощью термоионизационной масс-спектрометрии в отрицательных ионах (negative thermal ionization mass spectrometry, N-TIMS) на многоколлекторном масс-спектрометре “ThermoFisher” Triton в IGL, следуя аналитическим процедурам, подробно охарактеризованным в ряде работ [15, 16].

Начальное значение $\gamma^{187}\text{Os}(T)$ для образцов хромитита и самородного осмия было рассчитано как отклонение (в %) значения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ на момент их образования, принятому в данной работе ($T = 250$ млн лет), относительно среднего

хондритового $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -значения из работы [17], рассчитанного на тот же момент времени. Средний изотопный состав осмия в хондритах на момент образования образцов хромитита и минералов осмия был рассчитан с использованием константы распада ^{187}Re ($\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ год}^{-1}$) и начального изотопного состава осмия Солнечной системы на момент времени $T = 4558$ млрд лет: $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.09531$ и $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} = 0.40186$ [2, 17]. Начальное значение $\mu^{186}\text{Os}(T)$ было рассчитано как отклонение доли на миллион (ppm) значения $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ в изученных образцах хромитита и минералов осмия на момент их образования ($T = 250$ млн лет) относительно среднего хондритового $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ -значения из работы [6], рассчитанного на тот же момент времени, с использованием константы распада ^{190}Pt ($\lambda = 1.477 \times 10^{-12} \text{ год}^{-1}$) [1] и начального изотопного состава Солнечной системы на момент времени $T = 4567$ млн лет: $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1198269$ и $^{190}\text{Pt}/^{188}\text{Os} = 0.00174$. Следует отметить, что из-за очень низких значений $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ и $^{190}\text{Pt}/^{188}\text{Os}$ во всех проанализированных образцах, поправки на возраст измеренных $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ за счет радиоактивного распада ^{190}Pt и ^{187}Re были ниже погрешности измерения для индивидуальных анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы хромититов Гулинского массива характеризуются концентрациями платиноидов в пределах 191–866 мг/т; для них типично преобладание платиноидов Ir-группы (Os, Ir и Ru) над платиноидами Pt-группы (Rh, Pt и Pd) (табл. 1). Уровень концентраций и характер распределения платиноидов в хромититах Гулинского массива сходен с таковыми в подформных хромититах из мантийных разрезов дунит-гарцбургитовых массивов мира [18]. Среди МПГ-хромититов Гулинского массива доминируют Ir-содержащий осмий и лаурит (RuS_2). Таким образом, особенности геохимического распределения платиноидов в хромититах согласуются с формой нахождения МПГ в данных породах. Кристаллы самородного осмия (обр. 7-71 и 67, рис. 1 б, в), изученные методом

N-TIMS, характеризуются примитивными составами ($\text{Os}_{94}\text{Ir}_3\text{Ru}_3$ и $\text{Os}_{87}\text{Ir}_8\text{Ru}_5$ соответственно).

Первичная природа минералов осмия предполагает, что изотопный состав данных МПГ во время их образования соответствует таковому в источнике рудного вещества. Re–Os-изотопные результаты, полученные для кристаллов самородного осмия с помощью метода N-TIMS, демонстрируют ограниченный диапазон значений $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, варьирующий в пределах от 0.1244995 ± 0.0000005 до 0.1246370 ± 0.0000005 , при значении $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ менее 0.00006 ± 28 (табл. 2). Среднее первичное значение $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ составляет 0.12457 ± 0.00019 (2SD, $n = 2$), среднее значение $\gamma^{187}\text{Os}(T) = -0.61 \pm 0.16$ (2SD, рис. 2). Эти значения в пределах соответствующих погрешностей идентичны значениям $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и $\gamma^{187}\text{Os}(T)$ для образца хромитита G-40, изученного с помощью N-TIMS (0.1244256 ± 0.0000007 (2SE), $\gamma^{187}\text{Os}(T) = -0.728 \pm 0.001$ (2SE), табл. 2). Таким образом, полученные Re–Os-изотопные данные для кристаллов самородного осмия и хромитита неотличимы от эталонного значения для хондритов в это время (рис. 2), что свидетельствует об их происхождении из источника, который развивался длительное время с хондритовым отношением Re/Os.

В рамках Pt–Os-системы первичное значение $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и расчетное значение $\mu^{186}\text{Os}(T)$ для этого же образца хромитита (0.1198377 ± 0.0000007 и -2 ± 6 (2SE) соответственно; табл. 2) является хондритовым. Среднее расчетное значение $\mu^{186}\text{Os}(T)$ для минералов осмия ($+16.5 \pm 6.6$ (2SD)) тяготеет на диаграмме $\mu^{186}\text{Os}$ –возраст (рис. 2) к верхней части хондритового диапазона составов. Полученные Re–Os- и Pt–Os-изотопные данные свидетельствуют о том, что содержания сильно сидерофильных элементов, характерные для кристаллов самородного осмия и хромититов Гулинского массива, в значительной степени контролировались составом мантийного источника, который эволюционировал длительное время с околохондритовыми Re/Os- и Pt/Os-отношениями; этот источник находится в пределах Re–Os- и Pt–Os-изотопных параметров, характерных для большинства источников коматиитов и абиссальных перидотитов [3, 6, 9, 19, 20]. Отметим, что Re–Os-изотопные данные для более дифференцированных щелочных пород

Таблица 1. Содержания сильно сидерофильных элементов (мг/т) в хромититах Гулинского массива

№ обр.	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Re	ΣCCE	Pt/Pd	Pt/Ir
G-40	277.8	215.9	370.6	н.о.	1.0	0.27	н.о.	0.14	865.71	3.7	0.005
G-3	43	62	212	6.7	1.3	1.0	н.о.	0.29	326.29	1.3	0.021
G-5	94	34	56	4.6	1.1	1.0	н.о.	0.15	190.85	1.1	0.032

Примечание: “н.о.” – не определяли.

Таблица 2. Re-Os- и Pt-Os-изотопные N-TIMS данные для хромитита (обр. G-40) и самородного осмия (обр. 67 и 7-71) Гулинского массива

№ обр., рисунок	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(T)$	$\gamma^{187}\text{Os}(T)$	$^{190}\text{Pt}/^{188}\text{Os}$	$^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	$^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}(T)$	$\mu^{186}\text{Os}(T)$
G-40, рис. 1а	0.000250±12	0.1244256±7	0.12442	-0.7280±6	0.0000034±2	0.1198378±7	0.1198377	-2±6
67, рис. 1в	0.00006±28	0.1246370±5	0.124637	-0.56±0	0.0000044±0	0.1198397±5	0.1198397	+14±4
7-71, рис. 1б	0.00006±28	0.1244995±5	0.124500	-0.67±0	0.0000041±0	0.1198403±5	0.1198403	+19±4

Примечание: обр. G-40 – хромитит, обр. 67 и 7-71 – самородный осмий ($\text{Os}_{87}\text{Ir}_8\text{Ru}_5$ и $\text{Os}_{94}\text{Ir}_3\text{Ru}_3$ соответственно). Погрешности изотопных отношений и начального Os-изотопного состава приведены на уровне 2SD на основе долгосрочной воспроизводимости стандарта Джонсона-Маттея Os в изотопно-геохимической лаборатории Университета Мэрилэнда [16]. Начальные значения $\mu^{186}\text{Os}(T)$ and $\gamma^{187}\text{Os}(T)$ были рассчитаны для времени образования хромитита и минералов осмия ($T = 250$ млн лет) с использованием параметров, указанных в тексте. Погрешность измерения значений $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, $^{190}\text{Pt}/^{188}\text{Os}$, $^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ составляет 2SE от среднего значения в последнем десятичном знаке.

Маймеча-Котуйской провинции свидетельствуют, что эти породы имели гетерогенные мантийные источники [5], варьировавшие по составу от таковых характерных для астеносферной мантии до близких к источнику OIB.

Выводы о мантийном источнике сильно сидерофильных элементов согласуются с результатами изучения изотопной систематики серы в Ru–Os-сульфидах, сосуществующих с Os–Ir-сплавами Гулинского массива [13]. Таким образом, выявленные особенности изотопного состава осмия и серы для МПГ Гулинского массива свидетельствуют о мантийном источнике рудного вещества.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.В. Хиллер, П.С. Главатских, В. Палиулионите и Т. Майзелу за помощь при проведении минералого-геохимических исследований. Авторы признательны одному из анонимных рецензентов за конструктивные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-00140 (<https://rscf.ru/project/22-27-00140/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Begemann F., Ludwig K.R., Lugmair G.W., Min K., Nyquist L.E., Patchett L.E., Renne P.R., Shih C.-Y., Villa I.M., Walker R.J.* Call for an improved set of decay constants for geochronological use // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. № 1. P. 111–121.
2. *Smoliar M.I., Walker R.J., Morgan J.W.* Re-Os ages of group IIА, IIIА, IVА, and IVB meteorites // *Science*. 1996. V. 271. P. 1099–1102.
3. *Brandon A.D., Snow J.E., Walker R.J., Morgan J.W., Mock T.D.* ^{190}Pt - ^{186}Os and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of abyssal peridotites // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V. 177. P. 319–335.
4. *Meisel T., Walker R.J., Irving A.J., Lorand J.-P.* Osmium isotopic composition of mantle xenoliths: A global perspective // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. P. 1311–1323.
5. *Carlson R.W., Czamanske G., Fedorenko V., Ilupin I.* A comparison of Siberian meimechites and kimberlites: Implications for the source of high-Mg alkalic magmas and flood basalts // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. V. 7. № 11. Q11014.
6. *Brandon A.D., Walker R.J., Puchtel I.S.* Platinum-osmium isotope evolution of the Earth's mantle: constraints from chondrites and Os-rich alloys // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. P. 2093–2103.
7. *Day J.M.D., Walker, R.J., Warren, J.M.* ^{186}Os - ^{187}Os and highly siderophile element abundance systematics of the mantle revealed by abyssal peridotites and Os-rich alloys // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 200. P. 232–254.
8. *Malitch K.N., Puchtel I.S., Belousova E.A., Badani-na I. Yu.* A combined Re-Os and Pt-Os isotope and HSE abundance study of Ru-Os-Ir alloys from the Kunar and Unga placer deposits, the Taimyr Peninsula, Polar Siberia // *Minerals*. 2022. V. 12. № 11. Art. No. 1463. DOI: 10.3390/min12111463
9. *Puchtel I.S., Blichert-Toft J., Horan M.F., Touboul M., Walker R.J.* The komatiite testimony to ancient mantle heterogeneity // *Chemical Geology*. 2022. V. 594. 120776.

10. Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дуни-
товых массивов Восточной Сибири (геохимия, ми-
нералогия, генезис). С-Пб.: Санкт-Петербургская
картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1999. 296 с.
11. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И., Гер-
тнер И.Ф., Краснова Т.С., Колмаков Ю.В., Пани-
на Л.И., Чернышев А.И., Макеев С.М. Платиноносные
щелочно-ультраосновные интрузии Полярной Сиби-
ри. Томск: Изд. ЦНТИ, 2001. 510 с.
12. Kogarko L.N., Zartman R.E. A Pb isotope investigation of
the Guli massif, Maimecha-Kotuy alkaline-ultramafic
complex, Siberian flood basalt province, Polar Sibe-
ria // *Mineralogy and Petrology*. 2007. V. 89. P. 113–132.
13. Малич К.Н., Когарко Л.Н., Баданина И.Ю., Ве-
ливецкая Т.А., Игнатъев А.В. Изотопный со-
став серы Ru-Os сульфидов Гулинского массива
(Маймеча-Котуйская провинция, Россия): первые
данные // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507.
№ 2. С. 194–201. DOI: 10.31857/S2686739722601752
14. Paliulionyte V., Meisel T., Ramminger P., Kettisch P. High
pressure asher digestion and an isotope dilution-ICP-MS
method for the determination of platinum-group element
concentrations in chromitite reference materials CHR-
Bkg, GAN Pt-1 and HHH // *Geostandards and Geoan-
alytical Research*. 2006. V. 30. P. 87–96.
15. Puchtel I.S., Brandon A.D., Humayun M., Wal-
ker R.J. Evidence for the early differentiation of the core
from Pt-Re-Os isotope systematics of 2.8-Ga komati-
ites // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 237.
P. 118–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.023>
16. Puchtel I.S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R.J.,
Brandon A.D., Nicklas R.W., Kulikov V.S., Sam-
sonov A.V. Lithophile and siderophile element systematics
of Earth's mantle at the Archean–Proterozoic boundary:
Evidence from 2.4 Ga komatiites // *Geochimica et Cos-
mochimica Acta*. 2016. V. 180. P. 227–255. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.02.027>
17. Shirey S.B., Walker R.J. Re-Os isotopes in cosmochemis-
try and high-temperature geochemistry // *Annual Reviews
of Earth and Planetary Science* 1998. V. 26. P. 423–500.
18. Walker R.J., Prichard H.M., Ishiwatari A., Pimen-
tel M. The osmium isotopic composition of convecting
upper mantle deduced from ophiolite chromites // *Geo-
chimica et Cosmochimica Acta*. 2002. 66. 329–345.
19. Walker R.J., Horan M.F., Morgan J.W., Becker H., Gross-
man J.N., Rubin A.E. Comparative ¹⁸⁷Re–¹⁸⁷Os systemat-
ics of chondrites: implications regarding early solar system
processes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002.
V. 66. P. 4187–4201.
20. Fischer-Gödde M., Becker H., Wombacher F. Rhodium,
gold and other highly siderophile element abundances in
chondritic meteorites // *Geochimica et Cosmochimica
Acta*. 2010. V. 74. P. 356–379.

PLATINUM-RHENIUM-OSMIUM ISOTOPE SYSTEMATICS OF CHROMITITE AND NATIVE OSMIUM FROM THE GULI MASSIF (MAIMECHA-KOTUI PROVINCE, RUSSIA)

K. N. Malitch^{a,#}, I. S. Puchtel^{b,##}, Academician of the RAS L. N. Kogarko^{c,###}, I. Yu. Badanina^a

^a*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russian Federation*

^b*University of Maryland, College Park, MD20742, USA;*

^c*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

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

^{##}*E-mail: ipuchtel@umd.edu*

^{###}*E-mail: kogarko@geokhi.ru*

To gain insight into the source of ore material, this study presents the first Re-Os and Pt-Os isotopic and highly siderophile element (HSE) abundance data for chromitite and osmium minerals from the Guli massif of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites located in the Maimecha-Kotui province, Polar Siberia. The study utilized a number of analytical techniques, including electron microprobe analysis, negative thermal ionization mass spectrometry (N-TIMS) and high pressure asher digestion and an isotope dilution-inductively coupled plasma-mass spectrometry. The HSE concentrations in chromitite samples range from 191 to 866 ppb with a predominance of Ir-group platinum-group elements (PGE) (Os, Ir and Ru) over Pt-group PGE (Rh, Pt and Pd) and Re, which is consistent with their platinum-group mineral control (i.e., Os-Ir alloys and laurite, RuS₂) within the chromitite. The Re-Os and Pt-Os isotope data indicate that the HSE budget of the chromitite and osmium minerals from the Guli massif was largely controlled by that of the mantle source, which evolved with long-term near-chondritic Re/Os and Pt/Os ratios; this source is within the range of those for the majority of komatiite and abyssal peridotite sources.

Keywords: highly siderophile elements, native osmium, chromitite, Re-Os and Pt-Os isotope systems, mantle source, Guli massif, Maimecha-Kotui province