

Многофазные включения в самородном осмии (россыпь Адамсфилд, Тасмания)

Кутырев А.В.¹, Каменецкий В.С.¹, Чайка И.Ф.¹, Некрылов Н.А.², Сапегина А.В.^{1,3},
Крючкова Л.Ю.⁴, Шиловских В.В.⁴, Крашенинников С.П.⁵, Перчук А.Л.³

¹ Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

² Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

⁵ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

Аннотация. Зёрна самородного осмия из россыпного узла Адамсфилд (Тасмания) содержат набор многофазных включений, сложенных энстатитом, антофиллитом, роговой обманкой, кварцем, анортитом и другими минералами. Текстурные отношения показывают, что эти включения образовались в результате кристаллизации *in-situ*, а не в результате захвата фенокристов, как это предполагалось ранее. Включения являются первичными и отражают состав и параметры среды, в которой происходила кристаллизация осмия. Минеральный состав включений позволяет предположить, что они образовались в нижнекоровых условиях при взаимодействии расплава и метаморфизованного перидотита.

Ключевые слова: платиноиды, самородный осмий, перидотит, включения, метаморфизм.

Multiphase inclusions in native osmium nuggets (Adamsfield placer, Tasmania)

Kutyrev A.V.¹, Kamenetsky V.S.¹, Chaika I.F.¹, Nekrylov N.A.², Sapegina A.V.^{1,3}, Kryuchkova L.Yu.⁴, Shilovskikh V.V.⁴, Krasheninnikov S.P.⁵, Perchuk A.L.³

¹ Institute of Experimental Mineralogy, Moscow

² Fersman Mineralogical Museum, Moscow

³ Moscow State University, Moskva

⁴ Saint-Petersburg State University, St Petersburg

⁵ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Moscow

Abstract. The native osmium nuggets from Adamsfield placer district (Tasmania) comprise a set of multiphase inclusions composed of enstatite, anthophyllite, magnesio-hornblende, quartz, anorthite, and other minerals. Textural relationships show that these inclusions have formed through *in-situ* crystallization, rather than being the result of the entrapment of phenocrysts. The inclusions are primary and representative of the native osmium crystallization media. The mineral composition of the inclusions suggests that they originated under lower-crustal conditions during the interaction between melt and metamorphosed peridotite.

Keywords: Platinum-group elements, native osmium, peridotite, inclusions, metamorphism.

Введение

Элементы платиновой группы (ЭПГ) являются одними из наиболее редких и неравномерно распределенных металлов в земной коре и мантии: их концентрации едва достигают уровня мг/т в горных породах, поднимаясь до уровней г/т в рудах. Наиболее эффективным механизмом переноса и накопления ЭПГ является сульфидно-силикатная несмесимость (Naldrett, 2013). Однако в условиях недосыщенности сульфидной серой, ЭПГ проявляют резко сидерофильные свойства. К таким средам относятся окисленные островодужные магмы, где субмикронные включения интерметаллидов Pt-Fe и Os-Ir-Ru были описаны в ликвидусном хромшпинелиде (Kamenetsky et al., 2015), хромититы в массивах урало-аляскинского типа, где вес самородков изоферроплатины может достигать нескольких килограммов (Orlov, 2010), и хромититы в офиолитовых перидотитах и связанных с ними россыпях, где вес самого крупного зарегистрированного самородка осмия составляет 70 г (Reid, 1921).

Большинство современных моделей образования сплавов ЭПГ предполагают прямую кристаллизацию интерметаллидов из расплава. Осаждение микрокристаллов МПГ на поверхности растущих кристаллов хромшпинелида было промоделировано экспериментально (Finnigan et al., 2008) и подтверждается природными находками сплавов Pt-Fe и Os-Ir-Ru во вкрапленниках хромшпинелида из вулканических пород (Kamensky et al., 2015). Однако, механизм прямой кристаллизации из расплава может объяснить только образование крошечных включений минералов платиновой группы (МПГ) в хромшпинелиде, и не даёт ответ на вопрос о происхождении самородков или крупных зёрен. Простой расчет, предполагающий кристаллизацию самородного осмия из базальтового расплава с содержанием Os 0.3 ppb (Park et al., 2017) и плотностью 2.8 г/см³ при допущении 50 % извлечения Os, показывает, что для образования сферического зерна диаметром 1 мм (около 10 мг Os), типичного для россыпей, связанных с офиолитами (Cabri et al., 2022), потребуется примерно 23 м³ базальтового расплава. Для кристаллизации крупнейшего известного самородка осмия 70 г (Reid, 1921) потребуется около 165 000 м³ расплава. В насыщенных сульфидной серой системах такая эффективная экстракция металлов объясняется высоким отношением силикатного расплава к сульфидному, и высокими коэффициентами распределения платиноидов между ними (Campbell, Naldrett, 1979). Однако для безсульфидных систем подобных моделей нет. Значение эмпирического коэффициента распределения Os между шпинелью и силикатным расплавом не превышает 280 (Park et al., 2017), что на несколько порядков ниже значения аналогичного коэффициента для сульфидного и силикатного расплавов (Mungall, Brennan, 2014). Таким образом, механизм образования самородков и крупных зёрен осмия, равно как и других ЭПГ, на настоящий момент остаётся неизвестным.

В этой работе многофазные включения в природном осмии из россыпи Адамсфилд (Тасмания) используются для того, чтобы понять характер среды, в которой происходила кристаллизация крупных зёрен самородного осмия. Определение состава этой среды, а также, других её параметров, является ключевым для понимания процессов образования самородков осмия и других платиноидов без участия сульфидных расплавов.

Материалы и методы

Нагревание до гомогенизации и закалку многофазных включений, содержащих осмий, проводили для оценки валового состава включений. Эти эксперименты проводились в трубчатой печи, что позволяло осуществлять постепенный нагрев минеральных отложений с последующей быстрой закалкой путем опускания контейнера в воду. Печь состояла из сапфировой трубы, обвязанной нагревателем (железо-алюминиевый высокоомный сплав), изолированным шамотной глиной. Трубка помещалась в кожух печи, который для изоляции заполнялся наполнителем Al₂O₃. Система контроля температуры включала регулируемый источник питания постоянного тока, автоматический регулятор температуры и термопару Pt-Pt/Rh, помещенную в сапфировую трубку. Для предотвращения окисления, зерна осмия помещали в платиновую капсулу, наполненную избытком восстановительного наполнителя (алмазного порошка). Капсулу с зернами постепенно (~ 10° C/с) нагревали до 1400° C и выдерживали при этой температуре в течение 5 минут перед быстрой закалкой в воде. Расчетное время охлаждения включений составляло 3–4 секунды. После эксперимента зерна монтировались в эпоксидную подложку, шлифовались до обнажения включений и полировались безводной смазкой (масло WD-40).

Электронно-зондовый микроанализ дисперсии длин волн (WDS EPMA) выполнен на спектрометре JEOL JXA-8320 в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН), Новосибирск, Россия. Анализы силикатных минералов были получены при токе пучка 40 нА и ускоряющем напряжении 20 кВ. Концентрацию всех элементов измеряли по интенсивности их *Kα*-линий со временем сбора данных 10 с и измерением фонового сигнала в течение 5 с. В качестве эталонов использовали: альбит (Na₂O и Al₂O₃), диопсид (SiO₂, CaO и MgO), синтетическое стекло Gl-6 (TiO₂), хромсодержащий гранат (Cr₂O₃), ортоклаз (K₂O), пироп (FeO) и Mn- несущий гранат (MnO). Анализы стекол были получены при токе луча 30 нА и ускоряющем напряжении

20 кВ с использованием расфокусированного луча (диаметром ~ 5 мкм), чтобы избежать диффузии щелочей и летучих элементов. Так же, как и для силикатных минералов, все элементы измерялись по интенсивности их К α -линий со временем регистрации 10 с и измерением фонового сигнала в течение 5 с. В качестве стандартов использовали: F-флогопит (K-2O, F), Cl-апатит (P₂O₅, Cl), синтетический TiO₂ (TiO₂), диопсид (CaO, MgO), синтетический BaSO₄ (SO₃), альбит (SiO₂, Na₂O, K₂O), пирроп (FeO), Mn-содержащий гранат (MnO) и Cr-содержащий гранат (Cr₂O₃).

Полиминеральные включения в осмии

Россыпной узел Адамсфилд был открыт в 1925 г. в Западной Тасмании (Mertie, 1969; Peck et al., 1992). Большая часть добычи велась из ручьевых россыпей; зёрна осмия также были обнаружены в серпентинитах одноимённого ультрамафического массива (Mertie, 1969). В ассоциации МПГ россыпи преобладает самородный осмий с существенной примесью Ir и Ru (Cabri, Harris, 1975; Peck et al., 1992). Размер изученных зёрен варьирует от 0.5 до 1,5 мм. Зёрна характеризуется низкой степенью окатанности, сохранены признаки первичной морфологии кристаллов (рис. 1). Составы большей части зёрен самородного осмия попадают в узкий интервал: 46–55 мас. % Os, 39–43 мас. % Ir, 5–11 мас. % Ru, зональность в большинстве зёрен либо не фиксируется, либо выражена очень слабо (Cabri, Harris, 1975). К другим распространённым минералам относятся самородный иридий, самородный рутений, изоферроплатина, лаурит, сульфарсениды Rh и Ir.

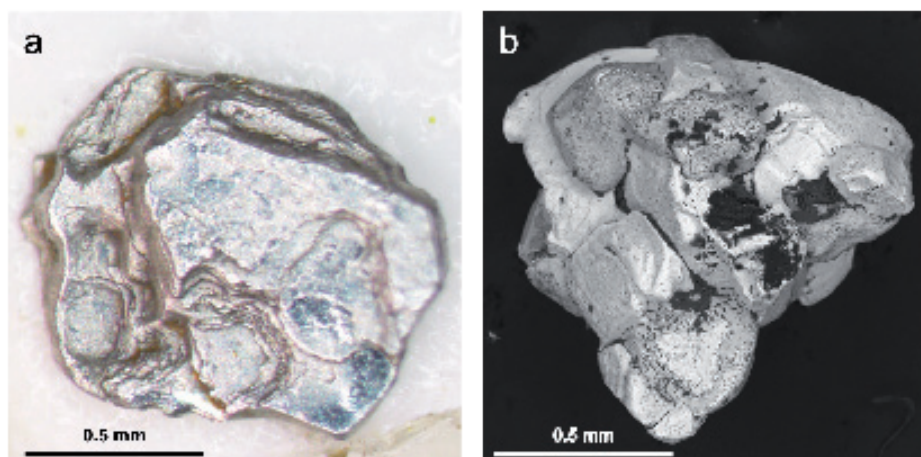


Рис. 1. Зерна МПГ из россыпи Адамсфилд: а – кристалл самородного осмия, б – сросток самородного осмия (светлая фаза) и ирарсита (темно-серая фаза в верхней части зерна).

Fig. 1. PGM grains from Adamsfield placer: a – native osmium crystal, b – intergrowth of native osmium (lighter phase) and irarsite (dark-grey phase on the top of the grain).

Включения в самородном осмии можно разделить на две группы: относительно редкие мономинеральные, сложенные оливином и хромшпинелидом (рис. 2 а), и многочисленные мультифазные (рис. 2 б-д). Мономинеральные включения роговой обманки рассматриваются вместе с многофазными из-за близости их составов и схожей морфологии. Размер многофазных включений колеблется от 10 до 50 мкм (рис. 2). Форма большинства включений шестиугольная. С учётом гексагональной симметрии самородного осмия, можно предположить, что включения представляют собой отрицательные кристаллы. Это подтверждаются и тем, что, если в одном зерне присутствует множество включений, их границы, как правило, параллельны друг другу. Кроме того, все 20 зерен осмия, исследованные методом дифракции обратного рассеяния электронов, представляют собой монокристаллы (с небольшой разориентировкой и следами пластических деформаций).

Большую часть изученных 102 полиминеральных включений составляют следующие минералы: роговая обманка (n=47), энстатит (n=19), кварц (n=17), антофиллит (n=16), оливин (n=6) и анортит (n=5). Многие из исследованных включений содержат слоистые силикаты, среди которых наиболее распространён хлорит (n=10), за ним следуют серпентин (n=4) и тальк (n=1).

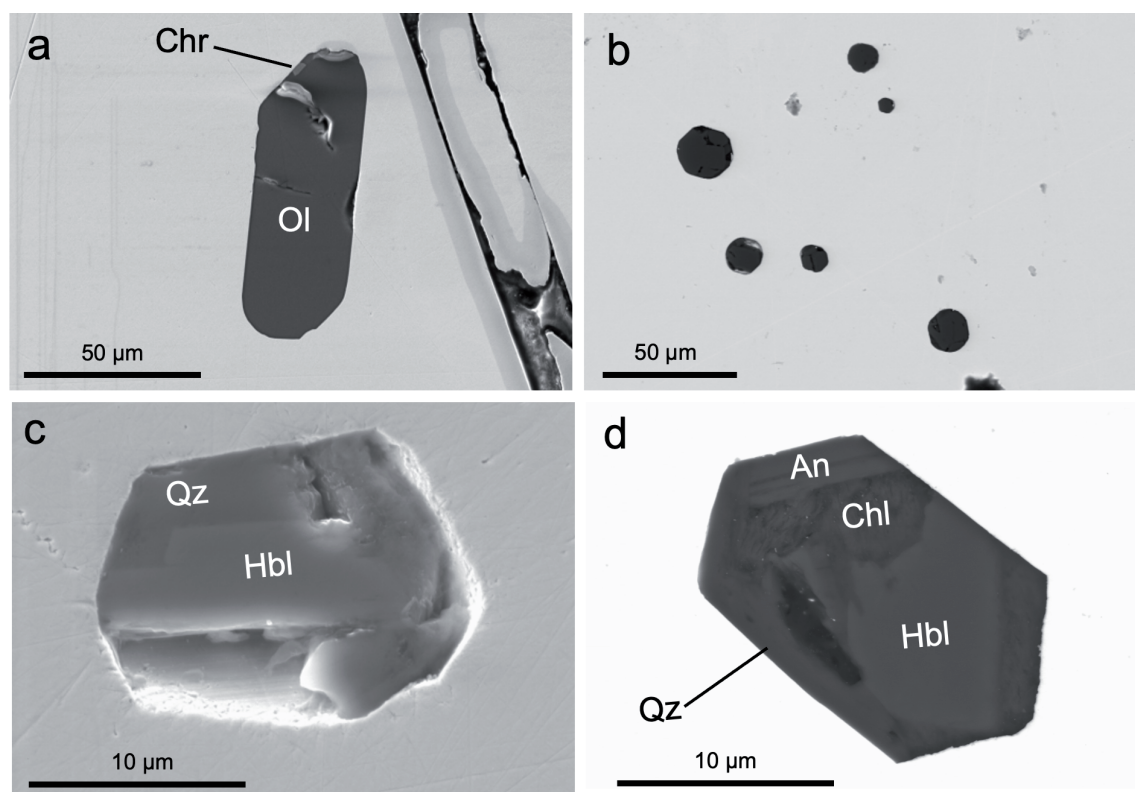


Рис. 2. Включения в самородном осмии россыпи Адамфилд: а – включение оливина (Ol) и хромшпинелида (Chr), б – включения, сложенные роговой обманкой и кварцем, в – крупный план многофазного включения роговой обманки (Hbl) и кварца (Qz), г – включение, сложенное кварцем, анортитом (An), хлоритом (Chl) и роговой обманкой.

Fig. 2. Inclusions in native osmium of Adamfield placer: a – olivine (Ol) and Cr-spinel (Chr) inclusion, b – multiple inclusions composed of hornblende and quartz, c – closeup view of hornblende (Hbl) and quartz (Qz) multiphase inclusion, d – inclusion composed of quartz, anorthite (An), chlorite (Chl) and hornblende.

Эксперименты по гомогенизации включений

Для оценки валового состава включений и проверки гипотезы их магматического происхождения была проведена серия экспериментов по нагреву и закалке с целью их гомогенизации. Нагрев включений при 1300 °C привел к образованию смеси стекла (? %) и реститовых кристаллов форстерита и энстатита. Нагрев при 1400 °C привел к полному плавлению 40 % включений, а остальные 60 % все еще содержали некоторое количество кристаллов форстерита и энстатита.

Таблица 1. Состав включений, полученных в результате экспериментов при 1400 °C

Table 1. Composition of experimental glasses at 1400 °C

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Total
1	0.33	20.32	9.40	57.31	0.00	0.02	0.03	6.88	0.04	0.08	0.16	3.25	97.80
2	0.36	27.85	6.47	51.40	0.04	0.02	0.03	4.97	0.03	0.14	0.09	4.95	96.33
3	0.35	20.64	8.40	52.09	0.01	0.02	0.02	7.42	0.04	0.07	0.11	8.37	97.53
4	0.35	21.65	9.94	56.67	0.02	0.01	0.03	7.28	0.05	0.04	0.12	2.09	98.24
5	0.44	19.23	10.93	55.35	0.00	0.02	0.01	8.84	0.04	0.03	0.05	4.03	98.96
6	0.34	22.59	8.50	53.86	0.02	0.01	0.02	7.27	0.03	0.06	0.09	4.45	97.24
7	0.62	18.23	11.08	53.07	0.02	0.00	0.02	9.05	0.04	0.17	0.13	2.33	94.77
8	0.33	23.98	8.19	56.51	0.00	0.01	0.02	6.10	0.02	0.02	0.06	2.38	97.64
9	0.00	36.89	1.12	55.44	0.00	0.00	0.00	0.58	0.01	0.70	0.07	4.04	98.85
10	0.01	53.99	0.00	40.85	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.09	6.27	101.23

Стекла при 1400 °C содержат 20–24 мас. % MgO и 52–57 мас. % SiO₂ (табл. 1). Наблюдается сильная положительная линейная корреляция между Al₂O₃ и CaO, и сильная отрицательная корреляция между этими элементами и MgO.

Дискуссия

В предыдущих работах включения в самородном осмии россыпей Адамсфилда объяснялись захватом фенокристов оливина и ортопироксена, что рассматривалось как доказательство прямой кристаллизации Os-Ir-Ru сплавов из бонинитовых магм (Peck et al, 1992). Однако новые данные показывают, что многофазные включения имеют форму отрицательных кристаллов, то есть, ксеноморфны по отношению к кристаллу-хозяину, а также, содержат кварц, антофиллит и анортит – минералы, которые не были описаны предшественниками, и прямая кристаллизация которых из бонинитового расплава в качестве ликвидусных фаз представляется маловероятной. Кроме того, среди минералов включений достаточно чётко прослеживается закономерность, заключающаяся в том, что кварц всегда ксеноморфен по отношению к другим минералам. Эти особенности свидетельствуют о росте минералов включений *in-situ*, внутри кристаллов самородного осмия.

Более того, мультифазные включения обнаружены в монокристаллах самородного осмия, а их распределение не показывает какой-либо приуроченности к системам трещин. Отсутствуют также какие-либо иные признаки связи включений со вторичными изменениями. Несмотря на значительные количественные вариации в минеральном составе включений, в них преобладает однотипная минеральная ассоциация. Кроме того, присутствие неизменённых высокомагнезиального оливина и ортопироксена во включениях в осмии, свидетельствует о том, что минералы были изолированы минералом-хозяином от воздействия поздних гидротермальных флюидов. Поэтому мы полагаем, что исследуемые включения являются первичными по происхождению, а значит отражающими среду кристаллизации осмия.

Морфология и состав включений, на первый взгляд, позволяют предположить, что они являются результатом раскристаллизации захваченного расплава. Однако, истинные расплавные включения должны соответствовать определенным петрологическим и минералогическим критериям. Во-первых, поскольку они представляют собой захваченный расплав, их состав не должен радикально отличаться в пределах одной популяции кристаллов и тем более одного кристалла. Во-вторых, содержимое расплавных включений может быть гомогенизировано с образованием единой фазы (за счет плавления каждой дочерней фазы и растворения газа или жидкости) при реалистичных для магматического процесса температурах. В-третьих, гомогенизированные стёкла, должны отражать равновесие расплав-кристалл и соответствовать составам известных в условиях земной коры и мантии расплавов. Ни один из этих критериев не соблюдается в случае изученных включений; поэтому их происхождение в результате захвата гомогенного расплава можно с уверенностью отвергнуть.

В качестве альтернативного объяснения можно предложить захват смеси расплава и кристаллов с последующей перекристаллизацией. Это предположение удовлетворительно объясняет как высокую вариативность содержания петрогенных элементов, так и невозможность достижения гомогенизации включений даже при 1400 °C. Дополнительным свидетельством является сильная линейная корреляция между CaO и Al₂O₃ и отрицательная корреляция между этими компонентами и MgO. Таким образом, состав включений может теоретически быть объяснён пропорцией захваченных при росте самородного осмия кристаллов богатой Ca и Al роговой обманки, и богатых Mg оливина и ортопироксена. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что оливин и ортопироксен в магматическом процессе имеют не котектические а перитектические взаимоотношения, сокристаллизуясь только в очень узком диапазоне *a*SiO₂ (Rebaza et al., 2023).

Обращает на себя внимание и то, что минеральная ассоциация включений характерна скорее для метаморфических, чем для магматических пород (например, ассоциация кварц + энстатит + антофиллит). Моделирование фазового равновесия при помощи Perple_X (Connolly, 2005) показывает, что ассоциация включений соответствует температуре 750 °C и давлению 900 МПа (глубина ≈ 30 км). Эти параметры можно интерпретировать несколькими способами. Во-первых,

исследуемые включения могли изначально представлять собой смесь расплава и кристаллов, захваченную в ходе роста самородного осмия при магматических температурах, и затем ретроградно метаморфизованную. Появление кварца, и в целом высокое содержание кремнезёма во многих включениях объясняется тем, что участвующий в этом процессе расплав был богат кремнезёмом, что может иметь место в надсубдукционных обстановках (Rebaza et al., 2023). Процесс реакции расплава с перидотитом предполагает не только присутствие в системе контрастных ультраосновного и относительно кислого компонента, но и существование контрастных химических потенциалов (к примеру, fO_2 и $aSiO_2$) между новообразующимися ортопироксенитами и перидотитами. Этим можно объяснить высокую гетерогенность среды минералообразования, выражающуюся в одновременном присутствии в некоторых зёрнах осмия включений оливина и многофазных включений, содержащих кварц. Взаимодействие расплава с перидотитами положено в основу большинства моделей образования хромититов (Arai, 1997).

Однако, наличие мономинеральных включений роговой обманки, свидетельствует о том, что наблюдаемая метаморфическая ассоциация могла уже существовать на момент образования включений, так как изолированные мономинеральные включения в осмии не могли изменить свой состав после захвата. Это косвенно подтверждается линейной корреляцией между Al_2O_3 и CaO в стёклах, полученных в результате гомогенизации включений, так как такая корреляция проще всего объясняется захватом кристаллов роговой обманки. Поэтому, можно предположить, что образование осмия и включений произошло в результате реакции расплава с перидотитом в нижнекоровых условиях, отвечающих значениям, полученным в результате моделирования фазового равновесия. В этом сценарии мономинеральные включения были захвачены растущим осмием и сохранили свой химический состав, в то время как минералы многофазных включений могли переуравновеситься при изменении условий. Альтернативным объяснением может быть захват минералов включений самородным осмием, в ходе его роста в метаморфической породе, ниже перидотитового солидуса. Эта идея является спорной, так как осмий большинством исследователей считается мало-подвижным элементом в метаморфических и гидротермальных процессах. Однако, в последнее время появились экспериментальные исследования, показывающие возможность мобильности осмия при мантийном метасоматозе (Foustoukos et al., 2019), поэтому полностью исключать возможность субсолидусного образования самородного осмия нельзя.

В заключение дискуссии необходимо отметить, что образование кристаллов самородного осмия могло быть многостадийным процессом. В таком случае включения оливина могли быть захвачены на одной (например, ранней) стадии, а полиминеральные включения на других стадиях. Наблюдаемые на настоящий момент минеральные ассоциации включений в таком случае являются результатом переуравновешивания и перекристаллизации захваченных и изолированных друг от друга минералом-хозяином кристаллических фаз и расплава. Длительным переуравновешиванием в условиях высоких температур может также объясняться отмеченное предшественниками (Cabri, Harris, 1975) и подтверждённое в этой работе отсутствие выраженной зональности в большинстве кристаллов самородного осмия.

Выводы

Полученные в настоящей работе новые данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Минеральная ассоциация включений содержит ряд минералов, не описанных предшественниками (антофиллит, роговая обманка, кварц, анортит). Новые находки, в совокупности с морфологическими особенностями включений, позволяют отвергнуть гипотезу о захвате фенокристов из бонинитового расплава.
2. Изученные включения также нельзя объяснить и результатом захвата гомогенного расплава.
3. Наиболее вероятный механизм образования включений предполагает взаимодействие расплава с нижнекоровыми перидотитами. При этом происходил захват минералов перидотита и/или расплава в различных пропорциях. Дальнейшее переуравновешивание изолированных включений привело к появлению наблюдаемой минеральной ассоциации.

4. В качестве альтернативной модели можно предположить субсолидусный рост кристаллов самородного осмия, при котором происходил захват уже существующей метаморфической минеральной ассоциации. В данном случае минералы также захватывались в различных пропорциях, чем объясняется вариативность составов включений.

5. Вероятным представляется многостадийное образование самородного осмия. Наблюдаемые во включениях минеральные ассоциации в таком случае могут быть результатом переуравновешивания и перекристаллизации захваченных и изолированных друг от друга минералом-хозяином кристаллических фаз и расплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №21-17-00122).

Литература

1. Arai S. Origin of podiform chromitites // *Journal of Asian Earth Sciences*. 1997. 15. P. 303–310.
2. Cabri L. J., Harris D. C. Zoning in Os-Ir alloys and the relation of the geological and tectonic environment of the source rocks to the bulk Pt:Pt+Ir+Os ratio for placers // *Canadian Mineralogist*. 1975. V. 13. P. 266–274.
3. Campbell I. H., Naldrett A. J. The influence of silicate:sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides // *Economic Geology*. V. 74. P. 1503–1506.
4. Connolly J.A.D. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 236. P. 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033>.
5. Finnigan C.F., Brennan J.M., Mungall J.E., McDonough W.F. Experiments and models bearing on the role of chromite as a collector of platinum group minerals by local reduction // *Journal of Petrology*. 2008. V. 49. P. 1647–1665. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn041>.
6. Foustoukos D.I. Hydrothermal oxidation of Os // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019. V. 255. P. 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.04.019>.
7. Kamenetsky V.S., Park J.W., Mungall J.E., Pushkarev E.V., Ivanov A.V., Kamenetsky M.B., Yaxley G.M. Crystallization of platinum-group minerals from silicate melts: Evidence from Cr-spinel-hosted inclusions in volcanic rocks // *Geology*. 2015. V. 43. P. 903–906. <https://doi.org/10.1130/G37052.1>.
8. Mertie J.B., Jr. Economic geology of the platinum group metals, U.S. Geol. ed. USGS. 1969. 630 p.
9. Mungall J.E. and Brenan J.M. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. V. 125. P. 265–289. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.002>.
10. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration. Springer Science & Business Media. 2013. 727 p.
11. Orlov V.N. Platinum Nuggets from the Diamond Fund of the Russian Federation: Witnesses of History // *Mineralogical Almanac*. 2010. V. 15. P. 4–28.
12. Park J.W., Kamenetsky V., Campbell I., Park G., Hanski E., Pushkarev E. Empirical constraints on partitioning of platinum group elements between Cr-spinel and primitive terrestrial magmas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 216. P. 393–416. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.05.039>.
13. Peck D.C., Keays R.R., Ford R.J. Direct crystallization of refractory platinum-group element alloys from boninitic magmas: Evidence from Western Tasmania // *Australian Journal of Earth Sciences*. 1992. V. 39. P. 373–387. <https://doi.org/10.1080/08120099208728031>.
14. Rebaza A.M., Mallik A., Straub S.M. Multiple episodes of rock-melt reaction at the slab-mantle interface: Formation of high silica primary magmas in intermediate to hot subduction zones // *Journal of Petrology*. 2023. V. 64. No 3. 11 p. <https://doi.org/10.1093/petroj/egad011>.
15. Reid A.M. Osmiridium in Tasmania, Hobart. 1921. 123 p.