

**XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ»:**

Сборник материалов, ИЭМ РАН,
Черноголовка, 2023 г., 97с.

В сборнике представлены материалы XIV Всероссийской школы молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия». Школа организована на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (г. Черноголовка, 27-28 ноября 2023 г.). В сборнике обсуждаются общие и частные проблемы экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Уделяется внимание условиям зарождения и эволюции магм, минеральным равновесиям в силикатных и рудных системах, исследованиям гидротермальных и флюидных систем, синтезу макро- и нанокристаллов, технической петрологии и материаловедению.

Все материалы представлены в авторской редакции

ISBN 978-5-6051043-0-8

ISBN 978-5-6051043-0-8



ВКЛЮЧЕНИЯ В ОЛИВИНЕ ИЗ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД ТУМРОКСКОГО ХРЕБТА (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА)

Н.И. Байков^{1,2}, И.Ф. Чайка¹, А.В. Кутырев³, В.С. Каменецкий⁴, В.Д. Щербаков², М.Е. Зеленский¹,
П.Ю. Плечов⁵

¹*ИЭМ РАН, г. Черноголовка, e-mail: baykovni@gmail.com*

²*Московский государственный университет, г. Москва*

³*Университет Орегона, Орегон, США*

⁴*ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

⁵*Минералогический музей Имени Ферсмана РАН, г. Москва*

Габбро-клинопироксенит-дунитовые комплексы Урало-Аляскинского типа являются перспективным источником платины, формирующимся в островодужных обстановках. Это концентрические зональные массивы, состоящей из дунитов, верлитов, оливиновых клинопироксенитов и иногда габбро, от ядра к кайме. Их образование связывают с островодужным анкарамитовым вулканизмом. Несколько таких комплексов было описано на территории Камчатки и Корякского нагорья, например Гальмознан и Эпильчик. Еще один менее изученный комплекс приурочен к Олюторскому террейну, сложенному позднекампанскими-раннепалеоценовыми вулканогенно-осадочными толщами. Андриановский Массив, расположенный на территории Тумрокского хребта, представляет собой дифференцированный массив дунит-клинопироксенит-габбрового состава. Также на территории Тумрокского хребта обнажаются ультраосновные и основные вулканы анкарамитовой серии, комагматичные Андриановскому массиву и объединяющиеся с последним в единый вулcano-плутонический комплекс [2]. Проявленность как интрузивных, так и эффузивных фаций в этом комплексе определяет его перспективность как модельного для изучения дифференциации анкарамитовой магмы и магматического этапа формирования комплексов Урало-Аляскинского типа.

Моделирование эволюции расплава является ключевым этапом в анализе процессов формирования массивов Урало-Аляскинского типа. Для определения состава исходного расплава требуется исследование его реликтов в виде включений в минералах оливине и хромшпинели. При анализе состава включений в хромшпинели следует учитывать ряд факторов, включая ограничения методов коррекции состава расплавных включений, возможности окисления хромшпинели в ходе постмагматических процессов, а также значительное влияние диффундирующих элементов, таких как Al, Mg, Fe²⁺ и Fe³⁺, на систему расплав-минерал-хозяин. Изучение включений в оливине также усложнено присутствием широко распространенной трещиноватости и петельчатой серпентинизации, что может приводить к нарушению целостности и вторичным изменениям включений. Несмотря на тщательное изучение данного массива, включения в оливине ранее не были описаны или обнаружены. В процессе исследования в образце 21AK47 (пикрит) был обнаружен автолит дунита. Он представлен мелкокристаллическим, равномернозернистым гипидиоморфным оливином, содержащим до 1% хромшпинели. Ближе к контакту с вмещающей породой обнаруживается присутствие интерстициального клинопироксена. Оливин высокомагнезиальный (#Mg 88.6–88.9) и содержание кальция (CaO масс. % 0.37–0.39%) и никеля (NiO масс.% 0.22–0.23%), ложится в тренд составов магматических оливинов Тумрокского хребта. Зерна оливина серпентинизированы, серпентин составляет 65–70%, что сопоставимо с степенью серпентинизации вкрапленников оливина в пикрите, однако в отличие от фенокристов оливина, серпентинизация происходила не петельчатым образом, а простиралась вдоль края кристаллов, вовлекая около 100–200 микронов зерен, что позволило сохраниться включениям приуроченным к центрам зерен.

В оливине встречаются минеральные включения клинопироксена и хромшпинели. Включения клинопироксена в оливине представляют собой кристаллы размером примерно 10–20 микрон, обладают кристаллографической структурой, иногда имеющей форму округлых кристаллов. Состав клинопироксена соответствует наиболее хромистому диопсиду (Cr₂O₃ 0.75–0.82 масс. %), который ложится в тренд пироксенов Тумрокского хребта. Включения хромшпинели представлены ограненными октаэдрическими кристаллами размером до 1 мм, с высоким содержанием магния (#Mg 54–57) и хрома (#Cr 75–88).

Морфологически выделяются две группы расплавных включений: Крупные – 30-120 мкм и маленькие – 3-30 мкм. Крупные расплавные включения обычно встречаются обособленно от других

включений. На их стенках кристаллизуется ОI и СРх, в объеме включений кристаллизуются скелетные кристаллы клинопироксена. Наиболее поздней фазой является Kfs и остаточное стекло. Кристаллы Срх низкомагнезиальные (#Mg 50-55). Кристаллизующийся оливин обладает меньшей магнезиальностью, чем оливин-хозяин (#Mg 87). Стоит отметить, что подобные включения были обнаружены в серпентинизированном оливине, из пикрита и верлита, однако из-за петельчатой серпентинизации оливина в данных образцах сохраняются лишь реликты скелетного пироксена в центрах зерен.

Расплавные включения, размером 3 до 30 мкм и широко распространены в оливине, располагаются скоплениями, обычно приурочены к краевым частям зерен. Они присутствуют в большинстве зерен оливина в автолите, тогда как в фенокристах оливина в пикрите они не сохраняются. Часто к таким скоплениям приурочены гетерогенные включения. Их можно классифицировать как расплав + клинопироксен, расплав + хромшпинель, расплав + сульфидные фазы, расплав + сульфидные фазы + ангидрид. Наибольший интерес представляют гетерогенные включения с сульфидными фазами, которые представлены распавшимися твердыми растворами и состоящие из пентландита и халькопирита. В одном включении обнаруживается сферический агрегат ангидрида, подобные включения были обнаружены в оливинах Толбачика и интерпретированы как ранние стадии захвата сульфидов оливином в процессе эволюции магматического очага. Образование таких включений связывается с высоким fO_2 (QFM+1 – QFM+1.5) и давлением более 3 кбар [6].

Для определения температуры кристаллизации использовался оливин-шпинелевый термометр. Полученные результаты говорят о кристаллизации пары шпинель-оливин при температуре 1225 ± 18 °C [3]. Давление оценивалось по паре оливин-клинопироксен, из включений в автолите и оценивается в 5 кбар [5]. Оливин-шпинелевый оксидометр дает оценку fO_2 = QFM+1.27 [1].

Монофракция оливина была прогрета при температуре 1240-1245 °C, в трубчатой печи в платиновой ампуле (ИЭМ РАН) с алмазным порошком в качестве буфера в течении пяти минут с последующей быстрой закалкой. Прогретые расплавные включения в оливине не содержат кристаллических фаз, однако сохраняют усадочный пузырек, это позволяет определить, что температура 1240 °C выше температуры гомогенизации по последнему кристаллу, но ниже температуры полной гомогенизации. Включения выведены на поверхность зерен оливина и перемонтированы в индиевую шашку. Полученные включения были измерены с помощью электронного микрозонда JEOL JXA-8230 (Лаборатория локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ).

Составы включений отфильтрованы по захвату апатиту ($CaO + P_2O_5$), SO_3 и потере Cl) (таб. 1). Полученные составы включений показывают заниженное содержание FeO в расплаве, в примитивных базальтах усредненное содержание FeO = 10.5 масс%. Характерно CaO/Al_2O_3 (масс. %) > 1, такое отношение характерно наиболее примитивным субвулканическим породам хребта (пикритам) и является свидетельством анкарамитового тренда магматизма. Заниженное содержание FeO в стекле связано с эффектом Fe-loss [4]. Этому свидетельствуют диффузионные профили в минерале хозяине, хорошо наблюдаемые вокруг крупных расплавных включений (рис. 1)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	SO ₃	P ₂ O ₅
02	49.68	0.52	12.92	8.00	0.18	11.07	13.46	1.65	2.08	0.19	0.04	0.20
03a	49.05	0.53	12.98	8.30	0.18	11.30	13.56	1.54	2.09	0.18	0.04	0.23
03b	49.43	0.43	12.98	8.05	0.12	11.22	13.58	1.58	2.09	0.17	0.07	0.27
05a	49.86	0.47	12.80	7.90	0.12	11.23	13.53	1.54	2.11	0.19	0.02	0.23
05b	50.03	0.43	12.69	7.91	0.13	11.12	13.55	1.54	2.08	0.18	0.07	0.26
n01a	49.78	0.48	12.87	8.01	0.15	11.10	13.60	1.48	2.07	0.17	0.04	0.25
n01b	49.13	0.49	13.02	8.01	0.18	11.32	13.62	1.63	2.11	0.17	0.07	0.24
n05	49.11	0.48	12.89	8.19	0.14	11.30	13.70	1.51	2.21	0.16	0.04	0.26
Fo _{87.1}	48.51	0.45	12.03	10.65	0.15	11.79	12.68	1.45	1.96	-	-	0.23
Fo _{92.9}	47.25	0.37	9.97	10.23	0.14	18.28	10.54	1.21	1.63	-	-	0.19

Таблица 1. Составы включений, не содержащих дочерние фазы и не потерявшие летучие.

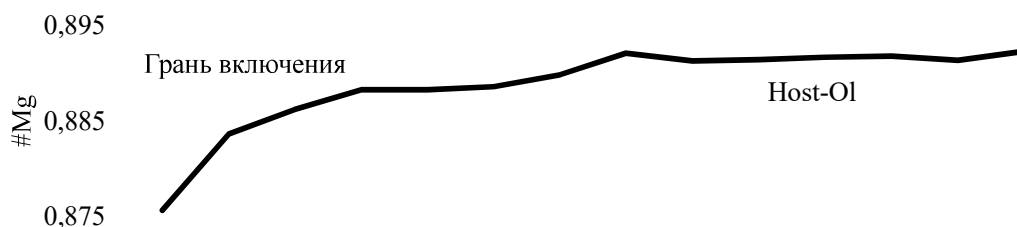


Рисунок 1. Диффузионный профиль оливина от границы включения

Для восстановления состава расплава и компенсации эффекта потери железа (Fe-Loss) было использовано программное обеспечение Petrolog и механизм реконструкции FeO в расплавных включениях, основанной на равновесии расплав-оливин, содержание FeO в расплаве было определено на основе среднего содержания FeO в наиболее примитивных базальтах (10.5 FeO). Полученные составы включений были реверс кристаллизованы до составов наиболее примитивных оливинов Тумрокского хребта (Fo_{92.9}). Эти данные позволяют восстановить предполагаемый примитивный расплав для пород Тумрокского хребта, состав расплава представлен в таблице и нанесен на график (Рис. 2).

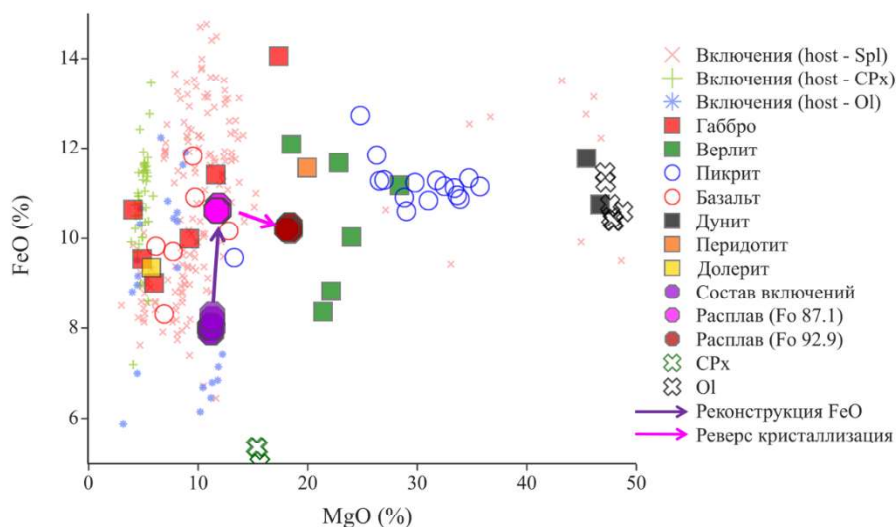


Рис. 2 Реконструкция и реверс кристаллизация включений

Электронная микроскопия, экспериментальные работы и, частично, полевые работы выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №21-17-00122 <https://rscf.ru/en/project/21-17-00122/>)

Список литературы:

1. Николаев Г.С., Арискин А.А., Бармина Г.С. и др. Тестирование Ol–OPx–Sp оксибарометра Балльхауса–Берри–Грина и калибровка нового уравнения для оценки окислительного состояния расплавов, насыщенных оливином и шпинелидом // *Геохимия*, 2016. (4). С. 323–343.
2. Chayka I.F., Baykov N.I., Kamenetsky V.S. et al. Volcano–Plutonic Complex of the Tumrok Range (Eastern Kamchatka): An Example of the Ural-Alaskan Type Intrusion and Related Volcanic Series. *Minerals*. 2023. 13 (1). P. 126.
3. Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chemical Geology*. 2014. 368. P. 1–10.
4. Danyushevsky L. V., Della-Pasqua F. N., Sokolov S. Re-equilibration of melt inclusions trapped by magnesian olivine phenocrysts from subduction-related magmas: petrological implications // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – Т. 138. – №. 1. – С. 68-83.
5. Köhler T.P., Brey G. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. 54 (9). P. 2375–2388
6. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A. et al. Silicate-sulfide liquid immiscibility in modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka): Part I. Occurrence and compositions of sulfide melts. *Chemical Geology*. 2018. 478. P. 102–111.