

Фазы высокого давления в L6 хондрите Dhofar 922: Кристаллизация оливин-рингвудитовых агрегатов и жадеита из расплава

Бажан И. С., Литасов К. Д., Бадюков Д. Д.

Аннотация

Методами рамановской спектроскопии и электронной сканирующей микроскопии проведено исследование фаз высокого давления (рингвудит, маскелинит и жадеит) в ударно-расплавленной жиле L6 хондрита Dhofar 922. Кристаллизация жадеита и рингвудита в жиле происходила на стадии регрессивного метаморфизма с понижением температуры и давления из расплава обломков основной массы плагиоклазового и оливинового состава, соответственно. В работе впервые высказано предположение о том, что повышенное содержание Fe и Mg, в областях плагиоклазового состава с жадеитом связано с разрывом смесимости при ~600 оС и ~700 оС в рядах геденбергит-жадеит и диопсид-жадеит, соответственно. Оценка P-T-условий образования ударно-расплавленных жил составляет >19 ГПа и >2150–2300 оС.

Ключевые слова:

метеорит, хондрит, рингвудит, мэйджорит, жадеит, маскелинит, ударный метаморфизм.

**ФАЗЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В L6 ХОНДРИТЕ DHO FAR 922:
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ОЛИВИН-РИНГВУДИТОВЫХ АГРЕГАТОВ И ЖАДЕИТА ИЗ
РАСПЛАВА**

И.С. Бажан¹, К.Д. Литасов^{1,2}, Д.Д. Бадюков³

¹ *Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, просп. академика
Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
Россия*

³ *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19,
Москва, 119991, Россия.*

Аннотация

Методами рамановской спектроскопии и электронной сканирующей микроскопии проведено исследование фаз высокого давления (рингвудит, маскелинит и жадеит) в ударно-расплавной жиле L6 хондрита Dhofar 922. Кристаллизация жадеита и рингвудита в жиле происходила на стадии регрессивного метаморфизма с понижением температуры и давления из расплава обломков основной массы плагиоклазового и оливинового состава, соответственно. В работе впервые высказано предположение о том, что повышенное содержание Fe и Mg, в маскелинит-жадеитовых агрегатах связано с разрывом смесимости при ~600 °C и ~700 °C в рядах геденбергит-жадеит и диопсид-жадеит, соответственно. Оценка *PT*-условий образования ударно-расплавных жил составляет >19 ГПа и >2150–2300°C.

Ключевые слова: метеорит, хондрит, рингвудит, мэйджорит, жадеит, маскелинит, ударный метаморфизм.

ВВЕДЕНИЕ

Ударно-метаморфизованные хондриты являются практически единственными природными объектами, которые содержат минералы, характерные для глубинной мантии Земли (вадслеит, рингвудит, мэйджорит, акимотоит, бриджманит, магнизиовюстит и др.). Образование фаз высокого давления в хондритах происходит в результате полиморфных превращений породообразующих минералов при ударных событиях, вызванных столкновением родительских тел метеоритов [Gillet, El Goresy, 2013; Tomioka, Miyahara,

2017]. Локализация высоких давлений и температур приводит к плавлению породы метеоритов с образованием ударно-расплавных жил (УЖ) шириной, как правило, не более первых миллиметров, в которых образуется большая часть фаз высоких давлений. Образование УЖ является результатом нескольких процессов: сжатия порового пространства вмещающей породы [Wünnemann et al. 2008]; нагрева вследствие трения и сдвиговых деформаций [Langenhorst et al. 2002; van der Bogert et al. 2003] и неравномерной локализации напряжения и температуры на границе минеральных зерен [Stöffler et al. 1991; Gillet, El Goresy, 2013]. Минералы высокого давления в метеоритах довольно редки, поэтому каждое новое исследование дает возможность расширить знания об ударных процессах на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

В настоящей работе проведено детальное исследование L6 хондрита Dhofar 922 методом рамановской спектроскопии, найдены новые фазы высокого давления и сделана оценка *PT*-условий их образования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метеорит Dhofar 922, обыкновенный хондрит L6, найден в Омане в области Дофар 6 февраля 2003 г. Для исследования были использованы несколько полированных шлифов метеорита из метеоритной коллекции РАН (рис.1). Петрографический анализ проводили на поляризационном микроскопе Nikon ECLIPSE LV100N POL. Детальное исследование микроструктуры проведено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan MYRA 3 LMU в условиях съемки с ускоряющим напряжением 15 кВ и током 1.4 нА. Химический состав минералов определяли с помощью энергодисперсионной рентгеновской приставки INCA Energy 450 X-Max 80 Oxford Instruments, совмещенной с СЭМ, и программы микроанализа «Oxford Instruments INCA 5.05». Время подсчета накопления сигнала спектра составляло 40 секунд. При определении химического состава фаз плагиоклазового состава использовался растровый режим, позволяющий снизить разрушающее воздействие электронного пучка на объект исследования. В качестве стандартов использовали природные и синтетические минералы [Лаврентьев и др., 2015].

Спектры комбинационного рассеяния получены на лазерном рамановском спектрометре Horiba Jobin Yvon HR800, оснащенный 1024-пиксельным CCD-детектором с 1800 г/мм решеткой, совмещенном с микроскопом Olympus (объективы 50^x и 100^x LMPLFLN) и с использованием твердотельного Nd:ИАГ лазера с длиной волны 532 нм. Для маскелинита и жадеита мощность лазерного излучения на образце составляла 8 мВ для прочих фаз 15 мВ, диаметр лазерного пучка 1-2 мкм. Калибровка рамановского

смещения проводилась относительно стандарта пика кремния, при $520.5 \pm 1 \text{ см}^{-1}$. Все аналитические работы проведены в ИГМ СО РАН, Новосибирск.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Хондрит Dhofar 922 имеет типичную хондритовую, брекчиевую текстуру, пронизанную тонкими УЖ черного цвета (рис. 1) шириной от 0.1 до 1.5 мм. В зернистой матрице выделяются полосчатые или равномернозернистые хондрулы размером 1-5 мм (рис.2а). Некоторые участки матрицы несут следы частичного плавления и образуют обособления, где зерна оливина сцементированы пироксен-плагиоклазовыми интерстиционными агрегатами (рис.2б). По существу, местами полному, замещению металла и троилита вторичными агрегатами гидроксидов железа метеорит имеет степень выветривания W4. Наличие высокобарических фаз свидетельствует о степени метаморфизма S6 [Stoffler et al., 1991].

Главные породообразующие минералы представлены оливином (25 мол.% фаялитового компонента, далее Fa_{25}), ортопироксеном ($\text{En}_{77}\text{Fs}_{21}\text{Wo}_{12}$), клинопироксеном ($\text{En}_{47}\text{Fs}_{53}\text{Wo}_{45}$), плагиоклазом или стеклом плагиоклазового состава (маскелинитом) ($\text{Ab}_{86}\text{An}_{10}\text{Or}_4$) (табл. 1, 2), камаситом (6.9-8.6 мас.% Ni), тэнитом (28.0-34.7 мас.% Ni) и троилитом. Редко встречаются хромит ($\text{Fe}_{0.86}\text{Mg}_{0.13}\text{Mn}_{0.01}$)($\text{Cr}_{1.60}\text{Al}_{0.24}\text{Fe}_{0.09}\text{Ti}_{0.07}$) $\text{O}_{4.00}$ и пентландит (23.3-34.4 мас.% Ni). Межзерновое пространство основной массы хондрита, включая границы зерен, заполнены троилит-FeNi расплавом или продуктами их выветривания. УЖ выполнены силикатным стеклом и мелкокристаллическими агрегатами мэйджорита с каплевидными вкраплениями Fe-Ni металла, троилита и моно- или полиминеральных обломков основной массы (рис.3; табл.1).

Метеорит Dhofar 922 содержит относительно крупные фиолетовые (в проходящем свете) выделения рингвудита (Fa_{34}) в виде округлых обломков размером до 100-200 мкм, погруженных в матрицу УЖ (рис.1). Некоторые обломки рингвудита рассечены трещинами, заполненными металлическим расплавом УЖ (рис.3). Рамановский спектр рингвудита приведён на рис. 4б. Основные пики 795 и 842 см^{-1} соответствуют стандартным значениям [McMillan et al., 1996]. Некоторые обломки оливинового состава в УЖ имеют сложную зональность, при которой внешняя часть обломков представлена рингвудитом (Fa_{35-38}), а внутренняя оливином (Fa_9) (рис. 3а; 4а-б).

Плагиоклаз-маскелинитовые участки отличаются по химическому и фазовому составу в основной массе метеорита и в обломках УЖ (табл. 2). Относительно крупные фрагменты (около 50 мкм) в УЖ обогащены FeO (0.8-1.0 мас.%), MgO (0.5-0.9 мас.%) и CaO (2.8-3.0 мас.%) и обеднены Na_2O (6.7-7.9 мас.%) по сравнению с участками в основной массе

метеорита (0.4-0.6 мас.% FeO; 1.8-2.2 мас.% CaO; 8.6-9.9 мас.% NaO). Положение линий рамановского спектра участков в основной массе соответствует плагиоклазу со значительным уширением полос (рис.5). Рамановский спектр обломков в УЖ (рис. 5а) содержит широкие линии, характерные для альбитового стекла (рис. 5б) и маскелинита. Спектры участков плагиоклазового состава размером до 10 мкм в УЖ матрице содержат линии жадеита (~371, ~527, ~580, ~692 и ~1033 см⁻¹) и мэйджорита (~663 и ~925 см⁻¹) (рис. 4в). Агрегаты плагиоклазового состава с жадеитом имеют «сферолитоподобную» микротекстуру (рис. 3б) ранее описанную в работе [Бажан и др., 2017]. Они обогащены Fe и Mg и обеднены Si и Al по сравнению с плагиоклаз-маскелинитовыми зёрнами в основной массе (Мск-ОМ) и маскелинитом в УЖ (Мск-УЖ) (табл.2). Мэйджорит представлен идиоморфными агрегатами размером до 5 мкм (рис. 3б) со средним составом $\text{Na}_{0.08}\text{Ca}_{0.15}\text{Mg}_{3.02}\text{Fe}_{0.58}\text{Cr}_{0.03}\text{Al}_{0.35}\text{Si}_{3.82}\text{O}_{12}$, что соответствует 82% мэйджоритового компонента. Мэйджорит обогащен Al_2O_3 (3.9-4.9 мас.%), CaO (1.7-2.1 мас.%) и Na_2O (0.5-0.7 мас.%) относительно низкокальциевого пироксена (0.5-1.1 мас.% CaO) (табл. 1). Химический состав ортопироксена и клинопироксена в основной массе почти полностью идентичен их составу в обломках, заключенных в УЖ (табл. 1).

В более раннем кратком сообщении по метеориту Dhofar 922 [Badjukov et al., 2005] охарактеризованы рингвудит, а также мелкозернистые и скрытокристаллические агрегаты вадслеита, мэйджорита и магнезиовюстита в матрице УЖ. В наших образцах вадслеита и магнезиовюстита обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокобарические полиморфные модификации оливина, рингвудит и вадслеит, являются порообразующими минералами переходного слоя мантии Земли в интервале 410-670 км [Ringwood, 1975, Akimoto et al., 1976]. Т. Рингвуд и А. Мэйджор [Ringwood, Major, 1966] впервые синтезировали серию твердых растворов рингвудита в интервале Fa_{100-15} , и оценили *PT*-условия перехода оливин-рингвудит как 17 ГПа и 900 °С, что эквивалентно глубине мантии около 500 км. В других, а также более поздних работах [Akimoto, Fujisawa, 1968, Kawai et al., 1970, Akaogi et al., 1989, Katsura, Ito, 1989, Ohtani et al., 1998] были построены фазовые диаграммы и определены *PT*-условия полиморфных превращений в системе $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$ в диапазоне 7-20 ГПа и 800-1600 °С. В природе рингвудит впервые был найден в УЖ L6 хондрита Tenham [Binns et al., 1969]. Почти все последующие находки и исследования рингвудита также были связаны с метеоритами [Xie et al., 2001, Ohtani et al., 2004, Zhang et al., 2006, Ozawa et al., 2009, Miyahara et al., 2013,

Feng et al., 2011]. Единственное зерно рингвудита в земных образцах найдено в качестве включения в сверхглубинном алмазе из россыпей Бразилии [Pearson et al., 2014].

Образование рингвудита и вадслеита в метеоритах происходит при высоких температурах и давлениях либо в результате твердофазной реакции из оливина [Brearley et al., 1992; Kerschhofer et al., 2000; Chen et al., 2004; Ohtani et al., 2004; Ozawa et al., 2009; Литасов и др., 2019], либо из расплава близкого состава [Miyahara et al., 2008, 2009; Feng et al., 2011]. В случае твердофазной реакции составы исходного оливина и продуктов реакции оказываются близки друг другу, а при образовании из расплава сильно отличаются. В метеорите Dhofar 922 состав рингвудита ($\Phi_{a_{34.4}}$) отличается от оливина ($\Phi_{a_{25.3}}$) в основной массе (табл. 1). Кроме того, в УЖ этого метеорита присутствуют обломки оливинового состава, в которых центральная часть представлена оливином (Φ_{a_9}), а внешняя рингвудитом ($\Phi_{a_{38}}$) (рис. 3а; 4а–б). Такая же фазовая зональность обломков со стехиометрией оливина описана в L5 хондрите GRV 052049 [Feng et al., 2011]. В работе [Miyahara et al., 2008] предложен механизм фракционной кристаллизации, при котором первым из ударного расплава оливина ($\Phi_{a_{24-26}}$) кристаллизуется тугоплавкий обогащенный магнием вадслеит (Φ_{a_6}), а затем из остаточного расплава с понижением температуры кристаллизуется обедненный магнием рингвудит ($\Phi_{a_{38}}$). Похожий механизм может быть применён для объяснения образования зональных оливин-рингвудитовых фрагментов в УЖ хондритов Dhofar 922 (рис. 3а) и GRV 052049 [Feng et al., 2011]. Согласно фазовой диаграмме перидотита KLB-1 (рис. 6) [Zhang, Herzberg, 1994] P-T-условия плавления фрагментов оливина $\Phi_{a_{25}}$ составляли 13-15 ГПа и 2000-2100 °С. Процесс дифференциации исходного гомогенного расплава ($\Phi_{a_{25}}$) может быть показан на фазовой диаграмме $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ [Ohtani et al., 1998] (рис. 7). Первым, при понижении температуры, кристаллизуется магнезиальный оливин (Φ_{a_4}) (стадия 1 на рис. 7), далее, по мере снижения температуры, кристаллизуется более железистый оливин, до тех пор, пока внешняя часть не достигнет состава $\Phi_{a_{25}}$ (стадия 2). Дальнейшее, незначительное снижение температуры приводит к кристаллизации первой порции рингвудита состава $\Phi_{a_{54}}$ на внешней железистой оболочке (стадия 3, Рис. 7). При последующем остывании системы происходит дифференциация на оливиновое ядро (Φ_{a_9}) и рингвудитовую ($\Phi_{a_{38}}$) оболочку (стадия 4, рис. 7). Закалка системы с сохранением рингвудита должна происходить до температуры обратного перехода рингвудита в оливин при 900 °С [Suzuki et al. 1980; Ming et al. 1991] (рис.6).

Фазы высокого давления плагиоклазового состава в Dhofar 922 представлены маскелинитом и ассоциацией жадеита и скрытокристаллического SiO_2 . Маскелинит – стекло плагиоклазового состава, образующееся при высоких температурах и давлениях. В

метеорите Dhofar 922 можно выделить две разновидности (генерации) маскелинита по степени аморфизации исходного плагиоклаза. Первая находится в основной массе, вторая в УЖ. Ширина полос раман спектра показывает степень аморфизации (рис. 5а). Для сравнения на рис. 5б приведена серия спектров альбита с различной степенью аморфизации: кристаллическое вещество, частичная аморфизация при 1270 °С и полная аморфизация с образованием стекла [McKeown, 2005]. Положение и ширина линий рамановских спектров агрегатов плагиоклазового состава в основной массе (Мск-ОМ) и в УЖ (Мск-УЖ) (рис. 5а) близки к спектрам частично аморфизированного альбита при 1270°С и альбитовому стеклу (рис. 5б), соответственно. Различная степень аморфизации напрямую свидетельствует о различном температурном и ударном воздействии на основную массу и УЖ метеорита. По всей видимости, температура основной массы в момент удара составляла ~1300 °С, тогда как температура в УЖ была достаточной (~2000-2100 °С) для полного плавления обломков плагиоклаза и оливина. На полное плавление плагиоклаза, при образовании маскелинита, в УЖ, указывает сравнение его химического состава с составом Мск-ОМ (табл. 2). Между расплавом УЖ и расплавленным плагиоклазом происходил обмен катионами. Мск-УЖ (0.9-1.0 мас.% FeO и 0.5-0.9 мас.% MgO) обогащался FeO и MgO за счет расплава жилы (16.1 мас.% FeO; 26.2 мас.% MgO) по сравнению с Мск-ОМ (0.4-0.6 мас.% FeO; 0 мас.% MgO), а часть Na₂O (6.6-7.9 мас.%) из расплава плагиоклаза (Мск-УЖ) уходила в расплав жилы (0.5 мас.% Na₂O) (табл. 2). Ранее [El Goresy et al., 1997; Ozawa et al., 2014; Бажан и др., 2017] отмечалось, что вместе с Na₂O в расплав жилы уходит и часть CaO, при этом относительное количество K₂O в плагиоклазовом расплаве увеличивается. Однако в Мск-УЖ в Dhofar 922 количество CaO (2.8-3.0 мас.%) увеличивается по сравнению с Мск-ОМ (1.8-2.2 мас.% CaO), а содержание K₂O практически не меняется (табл. 2). Концентрация CaO в расплаве жилы (2.0 мас.%) недостаточна, чтобы объяснить увеличение CaO в Мск-УЖ в среднем на 1.0 мас.%.

Жадеит – распространённый минерал высокого давления метаморфических и импактных пород, имеющий как земное, так внеземное происхождение. Ранее жадеит был найден во многих ударно-метаморфизованных хондритах [напр., Ozawa et al. 2009; 2014; Miyahara et al. 2013; Vazhan et al. 2017; Бажан и др., 2017]. По стехиометрии жадеитсодержащие агрегаты в метеоритах ближе к плагиоклазу, чем к клинопироксену. Это связано с избытком SiO₂ в химическом составе участков с жадеитом из хондритов, т.к. согласно экспериментальным данным [Bell, Roseboom 1969] при параметрах выше 3 ГПа и 1000 °С плагиоклаз распадается на жадеит и SiO₂. Образование жадеита может происходить либо в результате твердофазной реакции в таком случае составы областей с жадеитом и исходного плагиоклаза близки [Ozawa et al. 2009; Miyahara et al. 2013], либо из

его расплава плагиоклаза (в этом случае составы исходного и конечного плагиоклаза будут существенно отличаться) [Ozawa et al. 2014; Miyahara et al. 2013; Vazhan et al. 2017; Бажан и др., 2017]. Детальное исследование хондритов [Miyahara et al., 2013] показало, что участки с жадеитом состоят из двух фаз, собственно жадеита и остаточного аморфного материала, обогащённого SiO_2 и обедненного Na_2O , K_2O и Al_2O_3 . Содержание SiO_2 в жадеите из хондритов [Miyahara et al., 2013] составляет 57.4-61.8 мас.%. Небольшой избыток SiO_2 в областях плагиоклазового состава с жадеитом (Плаг-Жд) в Dhofar 922 (62.7 мас.%; табл. 2), вероятно, также связан с присутствием богатого кремнеземом аморфного материала.

Несмотря на то, что исходным материалом для образования Плаг-Жд областей и Мск-УЖ являлись близкие по составу фрагменты плагиоклаза основной массы, Плаг-Жд области более обогащены FeO (2.6-3.3 мас.%) и MgO (3.6-4.6 мас.%) по сравнению с Мск-УЖ (0.9-1.0 мас.% FeO и 0.5-0.9 мас.% MgO). Как и в случае с Мск-УЖ обогащение Плаг-Жд областей FeO и MgO было возможно при катионном обмене между расплавами плагиоклаза и УЖ. Однако, более сильное обогащение, вероятно связано с размерами Плаг-Жд областей, которые значительно меньше Мск-УЖ и составляют в среднем 10 и 50 мкм, соответственно. Плаг-Жд области в Dhofar 922 также обогащены FeO и MgO и обеднены Al_2O_3 (18.4-19.3 мас.%) по сравнению с Плаг-Жд областями в метеоритах Новосибирск (0.9-1.4 мас.% FeO ; 0.1-0.6 мас.% MgO ; 20.6-21.7 мас.% Al_2O_3) [Бажан и др., 2017] и Первомайский (1.3-1.8 мас.% FeO ; 0.3-0.7 мас.% MgO ; 20.1-20.6 мас.% Al_2O_3) [Vazhan et al. 2017]. Следует отметить, что среди анализов Плаг-Жд областей в хондритах Новосибирск и Первомайский примерно 20% анализов также имели аномальные содержания компонентов с крайними значениями 4.1 мас.% FeO , 8.7 мас.% MgO и 15.5 мас.% Al_2O_3 в хондрите Новосибирск и 4.5 мас.% FeO , 6.8 мас.% MgO и 17.0 мас.% Al_2O_3 в хондрите Первомайский, однако, при расчете средних значений такие анализы [Бажан и др., 2017; Vazhan et al. 2017] не принимались во внимание. Исходным для Плаг-Жд областей является расплав состава омфациит+ SiO_2 : $\text{Na}(\text{Al},\text{Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$ – $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ – SiO_2 . С понижением температуры при ~ 600 °C и ~ 700 °C в рядах геденбергит-жадеит $(\text{Ca},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ – $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ и диопсид-жадеит $(\text{Ca},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ – $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$, соответственно, происходит разрыв смесимости [Green et al., 2007] с образованием фаз с относительно высоким содержанием FeO и MgO , наблюдаемом в анализах Плаг-Жд областей.

Расплав УЖ помимо Fe^{2+} , может содержать Fe^{3+} , которое при высокой концентрации в исходном Плаг-Жд расплаве замещает Al^{3+} в позициях М1 жадеита [Green et al., 2007], что приводит к уменьшению общего количества Al_2O_3 в составе Плаг-Жд областей хондрита Dhofar 922. Косвенным подтверждением разрыва смесимости с образованием

богатых FeO и MgO фаз при остывании исходного Плаг-Жд расплава могут служить микрофотографии субмикронных кристаллов жадеита, имеющих выраженную зональность в обратно рассеянных электронах [Miyahara et al., 2013]. Кроме этого, повышенные содержания FeO и MgO в Плаг-Жд областях метеорита Dhofar 922 могут быть следствием стабилизации жадеитового компонента в области высоких давлений [Bobrov et al., 2008].

Результаты исследования фаз высокого давления позволяют оценить степень ударного метаморфизма, которому подверглось родительское тело метеорита Dhofar 922 в процессе эволюции. Как отмечалось выше, наличие в основной массе частично аморфизированных агрегатов плагиоклазового состава (Мск-ОМ) указывает на прогрев примерно до 1300 °С. Этой температуры было достаточно для плавления ассоциации троилит-FeNi-металл и их распределения по границам зерен и в виде глобулей (несмешиваемой жидкости). Ударное событие сопровождалось плавлением породы основной массы с образованием УЖ и минералов высокого давления как в микрокристаллической матрице УЖ (вадслеит, мэйджорит, магнезиовюстит), так и в заключенных в УЖ обломках (рингвудит + оливин, маскелинит, жадеит). РТ-условия плавления обломков оливина состава Fe_{25} соответствуют 13 ГПа и ~2000 °С, этих же РТ-условий было достаточно для начала плавления обломков плагиоклаза в УЖ (рис. 6). Максимальные значения давления и температуры образования УЖ в Dhofar 922 (~19 ГПа; ~2150–2300 °С) определяются ассоциацией минералов высокого давления (вадслеит, рингвудит и магнезиовюстит) в микрокристаллической матрице УЖ (рис. 6). Кристаллизация жадеита и рингвудита в УЖ происходила на стадии регрессивного метаморфизма с понижением температуры и давления из расплава обломков основной массы плагиоклазового и оливинового состава, соответственно. Условием сохранения рингвудита без обратного перехода в оливин была быстрая закалка системы до температуры 900 °С [Suzuki et al. 1980; Ming et al. 1991].

Отметим, что сравнение ассоциаций высокобарических минералов в метеоритах с полями термодинамической стабильности фаз на фазовых диаграммах, полученных в статических экспериментах не совсем корректно. Необходимо учитывать кинетику фазовых превращений, так как длительность ударных процессов в метеоритах составляет 10^{-3} - 10^0 секунд [Sharp, De Carli, 2006; Gillet, El Goresy, 2013]. Тем не менее, сравнение с ударным экспериментом еще менее информативно, так как формирование высокобарических минералов в них практически не происходит, даже при давлениях выше 100 ГПа (напр., [Stöffler et al., 1991]) из-за короткой длительности ударного импульса (~ 10^{-7} сек). Потенциально важными являются эксперименты со сферически сходящейся ударной волной [Козлов, Сазонова, 2012]. В подобных экспериментах длительность

ударного импульса составляет $\sim 10^{-6}$ сек с повторными импульсами меньшей интенсивности. В результате в экспериментах с природными горными породами были получены высокобарические фазы, такие как рингвудит и, возможно, бриджманит [Козлов, Сазонова, 2012]. Детальная характеристика продуктов экспериментов в сферических ударных волнах является одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе эволюции родительское тело метеорита Dhofar 922 (L6) подверглось ударному воздействию, которое сопровождалось плавлением материнской породы с образованием УЖ и фаз высокого давления как в микрокристаллической матрице УЖ (вадслеит, мэйджорит, магнезиовюстит), так и в заключенных в УЖ фрагментах (маскелинит, рингвудит и жадеит). Плагиоклаз основной массы в результате ударного воздействия подвергся частичной аморфизации. РТ-условия образования УЖ составили >19 ГПа и $>2150-2300$ °С. Кристаллизация жадеита и рингвудита в УЖ происходила на стадии регрессивного метаморфизма с понижением температуры и давления из расплавленных обломков основной массы плагиоклазового (омфацит + SiO_2) и оливинового состава, соответственно. В работе впервые высказано предположение о том, что повышенное содержание Fe и Mg, в областях плагиоклазового состава с жадеитом в хондритах связано с разрывом смесимости при ~ 600 °С и ~ 700 °С в ряду геденбергит-жадеит и диопсид-жадеит, соответственно.

Авторы выражают благодарность рецензентам работы А.В. Боброву и В.В. Шарыгину за ценные замечания. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-05-00851).

ЛИТЕРАТУРА

- Бажан И.С., Одзава С., Мияхара М., Отани Э., Литасов, К.Д.** Секреционный рост жадеита из расплава в ударных жилах Н5/6 хондрита Новосибирск // Геология и геофизика, 2017, т. 58, №1, с. 17–26.
- Козлов Е.А., Сазонова Л.В.** Преобразования горных пород в сферических ударных волнах: новые экспериментальные результаты // Петрология, 2012, т. 20, №4, с. 334-334.
- Лаврентьев, Ю.Г., Карманов, Н.С., Усова, Л.В.** Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп // Геология и геофизика, 2015, т. 56, №8, с. 1473-1482.

- Литасов, К.Д., Бадюков, Д.Д., Похиленко, Н.П.** Параметры образования минералов высокого давления в хондритовых метеоритах Dhofar 717 и 864 // Доклады Академии Наук, 2019, в печати.
- Akaogi M., Navrotsky A.** The quartz-coesite-stishovite transformations: new calorimetric measurements and calculation of phase diagrams // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1984, v. 36, p. 124–134.
- Akaogi M., Ito E., Navrotsky A.** Olivine-modified spinel-spinel transitions in the system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 : Calorimetric measurements, thermochemical calculation, and geophysical application // *Journal of Geophysical Research*, 1989, v. 94, p. 15671–15685.
- Akimoto S., Fujisawa H.** Olivine-spinel solid solution equilibria in the system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 // *Journal of Geophysical Research*, 1968, v. 73, p. 1467–1479.
- Akimoto S., Matsui, Y., Syono, Y.** High-pressure crystal chemistry of orthosilicates and the formation of the mantle transition zone // *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*/ Ed. R. G. Strens. Wiley, London, 1976, p. 327–363.
- Badjukov D., Brandstaetter F., Kurat G., Libowitzky E., Raitala J.** Ringwoodite-olivine assemblages in Dhofar 922 L6 melt veins, // *Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, Houston, USA, 2005, p. 1684.
- Bazhan I. S., Litasov K. D., Ohtan, E., Ozawa S.** Majorite-olivine-high-Ca pyroxene assemblage in the shock-melt veins of Pervomaisky L6 chondrite // *American Mineralogist*, 2017, v. 102, p. 1279–1286.
- Brearley A., Rubie D., Ito E.** Mechanisms of the transformations between the α , β and γ polymorphs of Mg_2SiO_4 at 15 GPa // *Physics and Chemistry of Minerals*, 1992, v. 18, p. 343–358.
- Bell P.M., Roseboom Jr, E.H.** Melting relationships of jadeite and albite to 45 kilobars with comments on melting diagrams of binary systems at high pressures // *Mineralogical Society of America Special Paper*, 1969, v. 2, p. 151–169.
- Binns R. A., Davis R. J. Reed S. J. B.** Ringwoodite, natural $(Mg,Fe)_2SiO_4$ spinel in the Tenham meteorite // *Nature*, 1969, v. 221, p. 943–944.
- Bobrov, A.V., Kojitani, H., Akaogi, M., Litvin, Y.A.** Phase relations on the diopside–jadeite–hedenbergite join up to 24 GPa and stability of Na-bearing majoritic garnet // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, v.72, p. 2392–2408.
- Chen M., El Goresy A., Gillet P.** Ringwoodite lamellae in olivine: Clues to olivine–ringwoodite phase transition mechanisms in shocked meteorites and subducting slabs // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, v. 101, p. 15033–15037.

- El Goresy A., Wopenka B., Chen M., Weinbruch S., Sharp T.** Evidence for two different shock induced high-pressure events and alkali-vapor metasomatism in Peace River and Tenham (L6) chondrites // Lunar and Planetary Science Conference XXVIII, Houston, USA, XXVIII, 1997, p. 329–330.
- Feng L., Lin, Y., Hu S., Xu L., Miao B.** Estimating compositions of natural ringwoodite in the heavily shocked Grove Mountains 052049 meteorite from Raman spectra // *American Mineralogist*, 2011, v. 96, p. 1480–1489.
- Green E., Holland T., Powell R.** An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks // *American Mineralogist*, 2007, v. 92, p. 1181-1189.
- Gillet P., El Goresy A.** Shock events in the Solar System: The message from minerals in terrestrial planets and asteroids // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, v. 41, p. 257-285.
- Katsura T., Ito E.** The system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 at high pressures and temperatures: Precise determination of stabilities of olivine, modified spinel, and spinel // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, v. 94, p. 15663–15670.
- Kawai N., Endho S. Itho K.** Split sphere high pressure vessel and phase equilibrium relation in the system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1970, v. 3, p. 182–185.
- Kerschhofer L., Rubie D., Sharp T., McConnell J. Dupas-Bruzek C.** Kinetics of intracrystalline olivine–ringwoodite transformation // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, v. 121, p. 59–76.
- Langenhorst F., Poirier J.P., Deutsch A., Hornemann U.** Experimental approach to generate shock veins in single-crystal olivine by shear melting // *Meteoritics and Planetary Science*, 2002, v. 37, 1541–1553.
- McMillan, P.F., Hemley, R.J., Gillet, P.** Vibrational spectroscopy of mantle minerals // In: Dyar, M.D., McCammon, C., Schaefer, M.W. (Ed.), *Mineral Spectroscopy: A Tribute to Roger G. Burns*. Geochemical Society special publication, 1996, v.5, pp. 175–213.
- McKeown D. A.** Raman spectroscopy and vibrational analyses of albite: From 25 °C through the melting temperature, 2005, *American Mineralogist*, v. 90, p. 1506–1517.
- Ming L., Kim Y., Manghnani M., Usha-Devi S., Ito E., Xie H.S.** Back-transformation and oxidation of $(Mg,Fe)_2SiO_4$ spinels at high temperatures. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1991, v. 18, 171–179.
- Miyahara M., El Goresy A., Ohtani E., Nagase T., Nishijima M., Vashaei Z., Ferroir T., Gillet P., Dubrovinsky L., Simionovici, A.** Evidence for fractional crystallization of

- wadsleyite and ringwoodite from olivine melts in chondrules entrained in shock-melt veins // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, v. 105, p. 8542–8547.
- Miyahara M., El Goresy A., Ohtani E., Kimura M., Ozawa S., Nagase T., Nishijima M.** Fractional crystallization of olivine melt inclusion in shock-induced chondritic melt vein // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, v. 177, p. 116–121.
- Miyahara M., Ozawa S., Ohtani E., Kimura M., Kubo T., Sakai T., Nagase T., Nishijima M., Hirao N.** Jadeite formation in shocked ordinary chondrites // *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, v. 373, p. 102–108.
- Ohtani E., Moriwaki, K., Kato T., Onuma K.** Melting and crystal-liquid partitioning in the system Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 to 25 GPa // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, v. 107, p. 75–82.
- Ohtani E., Kimura Y., Kimura M., Takata T., Kondo T., Kubo T.** Formation of high-pressure minerals in shocked L6 chondrite Yamato 791384: constraints on shock conditions and parent body size // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, v. 227, p. 505–515.
- Ozawa S., Ohtani E., Miyahara M., Suzuki A., Kimura M., Ito Y.** Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and pressure-temperature conditions of the shock events // *Meteoritics and Planetary Science*, 2009, v. 44, p. 1771–1786.
- Ozawa S., Miyahara M., Ohtani E., Koroleva O.N., Ito, Y., Litasov K.D. Pokhilenko N.P.** Jadeite in Chelyabinsk meteorite and the nature of an impact event on its parent body // *Scientific Reports*, 2014, v. 4, 5033, doi: 10.1038/srep05033.
- Pearson D.G., Brenker F.E., Nestola F., McNeill J., Nasdala L., Hutchison M.T., Matveev S., Mather K., Silversmit G., Schmitz S., Vekemans B., Vincze L.** Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond // *Nature*, 2014, v. 507, p. 221–224.
- Ringwood A.E., Major A.** Synthesis of Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4 spinel solid solutions // *Earth and Planetary Science Letters*, 1966, v. 1, p. 241–245.
- Ringwood A.E.** *Composition and Petrology of the Earth's Mantle* // MacGraw-Hill, 1975, p. 1–672.
- Sharp T.G., DeCarli P.S.** Shock effects in meteorites // In: *Meteorites and the early solar system II*, Arizona University Press, 2006, pp. 653–677.
- Suzuki I., Ohtani E., Kumazawa M.** Thermal expansion of modified spinel, beta- Mg_2SiO_4 // *Journal of Physics of the Earth*, 1980, v. 28, p. 273–280.
- Stöffler D., Keil K. Scott E.R.D.** Shock metamorphism of ordinary chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, v. 55, p. 3845–3867.

- Tutti F.** Formation of end-member $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ hollandite-type structure (lingunite) in diamond anvil cell // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, v. 161, p. 143–149.
- Tomioka N., Miyahara M.** High-pressure minerals in shocked meteorites // *Meteoritics & Planetary Science*, 2017, v. 52, p. 2017–2039.
- van der Bogert C.H., Schultz P.H., Spray J.G.** Impact-induced frictional melting in ordinary chondrites: A mechanism for deformation, darkening, and vein formation // *Meteoritics and Planetary Science*, 2003, v. 38, p. 1521–1531.
- Wünnemann K., Collins G., Osinski G.** Numerical modelling of impact melt production in porous rocks // *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, v. 269, 530–539.
- Zhang J., Herzberg C.** Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 from 5.0 to 22.5 GPa // *Journal of Geophysical Research*, 1994, v. 99, p. 17729–17742.
- Xie X., Chen M., Wang D.** Shock-related mineralogical features and PT history of the Suizhou L6 chondrite // *European Journal of Mineralogy*, 2001, v. 13, p. 1177–1190.
- Zhang A.C., Hsu W.B., Wang R.C., Ding M.W.** Pyroxene polymorphs in melt veins of the heavily shocked Sixiangkou L6 chondrite // *European Journal of Mineralogy*, 2006, v. 18, p. 719–726.
- Zhou Y., Irifune T., Ohfuji H., Shinmei T., Du W.** Stability region of $\text{K}_{0.2}\text{Na}_{0.8}\text{AlSi}_3\text{O}_8$ hollandite at 22 GPa and 2273 K // *Physics and Chemistry of Minerals*, 2017, v. 44, p. 33–42.

High-pressure phases in L6 chondrite Dhofar 922: Crystallization of olivine-ringwoodite aggregates and jadeite from melt

I.S. Bazhan, K.D. Litasov, D.D Badyukov

The high-pressure phases (ringwoodite, maskelynite and jadeite) appear as the coarse-grained fragments in the shock-melt vein (SMV) of Dhofar 922 L6 chondrite and were studied by the energy-dispersive X-ray spectrometry and laser micro-Raman spectrometry. Ringwoodite and jadeite crystallization occur during a cooling-decompression stage from plagioclase (omphacite+SiO₂) and olivine melted fragments, respectively. We suggest that high content of FeO and MgO in jadeite-plagioclase-bearing areas is related to miscibility gap at ~600 °C and ~700 °C in hedenbergite-jadeite and diopside-jadeite joins, respectively. Our estimation of PT-condition for the formation of SMV is >19 GPa and >2150–2300 °C.

Подписи к рисункам (Бажан и др., Геология и геофизика)

Рисунок 1. а) Фотография полированного шлифа хондрита Dhofar 922. Пунктирной линией обозначены контуры ударно-расплавленной жилы (УЖ), пересекающей вмещающую хондритовую породу; б) увеличенный участок УЖ; в) увеличенная область на рисунке (б). Фиолетовые зерна рингвудита (Рв) погружены в скрытокристаллическую матрицу УЖ.

Рисунок 2. Элементы микроструктуры хондрита Dhofar 922: а) мелкозернистые и полосчатые хондрулы (Хд) в крупнозернистой матрице хондрита; б) кристаллы оливина (Ол) сцементированные пироксен-плагиоклазовым агрегатом. УЖ – ударно-расплавная жила.

Рисунок 3. Матрица ударной расплавленной жилы (УЖ): а) с обломками оливина (Ол) с составом Ф_{a9} и рингвудита (Рв) с составом Ф_{a38} ; и б) областью маскелинита с жадеитом (Мск-Жд). Хр, хромит; Мд, мэйджорит; Тро, троилит; Кам, камасит.

Рисунок 4. Рамановские спектры оливина (а) и рингвудита (б) зонального фрагмента на рис. 3а; в) области плагиоклазового состава с жадеитом на рис. 3б. Мд, мэйджорит; Жд, жадеит.

Рисунок 5. а) Рамановские спектры маскелинита ($\text{Аб}_{86}\text{Ан}_{10}\text{Ор}_3$) в основной массе (Мск-ОМ) и маскелинита ($\text{Аб}_{75}\text{Ан}_{21}\text{Ор}_5$) в УЖ (Мск-УЖ); б) эталонные спектры разных агрегатных состояний альбита [McKeown, 2005].

Рисунок 6. *PT*-условия образования фаз высокого давления в метеорите Dhofar 922. Приведены: линии солидуса и ликвидуса для перидотита KLB-1 [Zhang, Herzberg, 1994]; поля 1 и 2 соответствуют условиям кристаллизации матрицы УЖ (17–23 ГПа и 2100–2300°C). Пунктирные линии соответствуют полям стабильности минералов в альбитовой системе [Bell, Roseboom, 1969; Akaogi, Navrotsky, 1984; Tutti, 2007; Ozawa et al., 2014; Zhou et al., 2017]. Серые линии - фазовая граница оливин (Ол) / оливин + рингвудит (Рв) для составов Ф_{a25} , и Ф_{a38} [Akaogi et al., 1989]. Точечная линия – плавление магнезиовюститита (Мв) [Zhang, Herzberg, 1994]. Пунктир при 900°C – линия закалки высокобарических фаз без обратного перехода в низкобарические модификации [Suzuki et al. 1980; Ming et al. 1991]. Аб – альбит; Жд – жадеит; Кв – кварц; Коэс – коэсит; Ст – стишовит; Лин – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ лингунит; Р – расплав; Мд – мэйджорит; Бр – бриджманит; Са-пв – CaSiO_3 -перовскит.

Рисунок 7. Фрагмент фазовой диаграммы $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$ при 8.5 ГПа [Ohtani et al., 1998], объясняющий механизм образования зональных оливин (Ол)-рингвудитовых (Рв) агрегатов на рис. За. Цифры (1, 2, 3, 4) в *PT*-поле – стадии процесса (см. текст). Р, расплав; Фа, фаялит; Фо, форстерит.

Таблица 1. Средний химический состав (ЭДС, мас.%) минералов основной массы (ОМ) хондрита Dhofar 922, их обломков в ударно-расплавленной жиле (УЖ) и мэйджорита из силикатной матрицы УЖ.

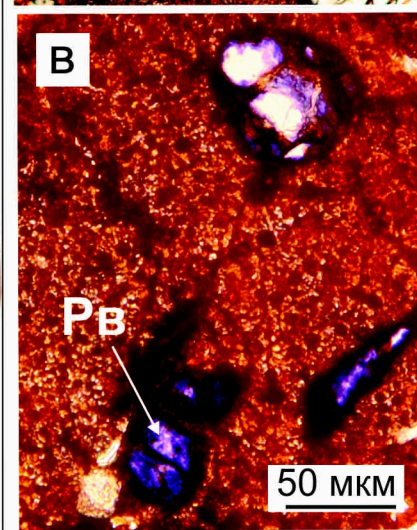
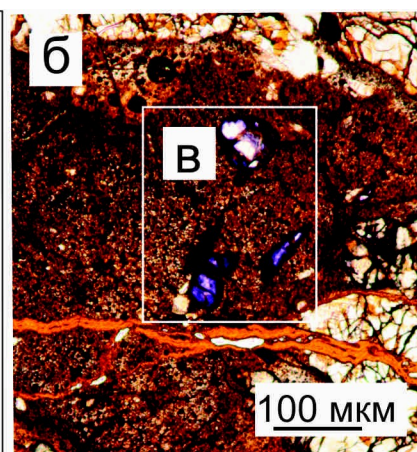
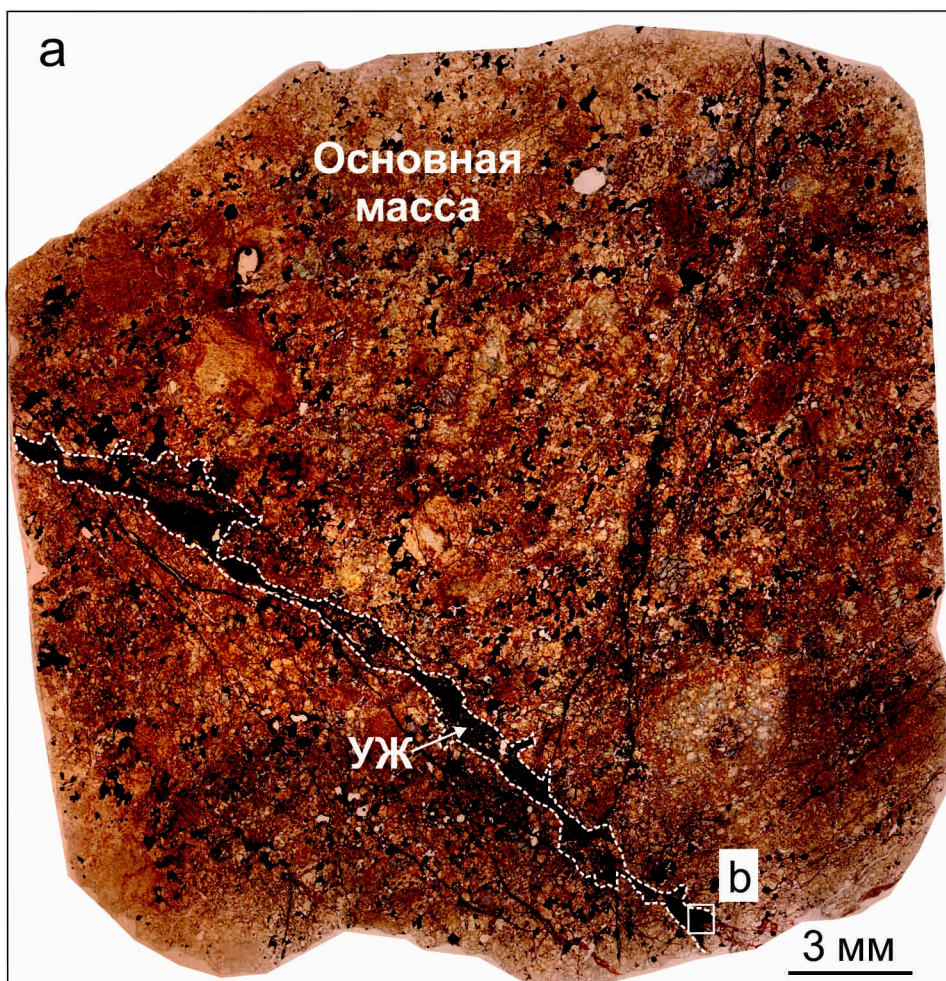
Минерал	оливин	рингвудит		клинопироксен		ортопироксен		Мэйджорит	Расплав
	ОМ	УЖ		ОМ	УЖ	ОМ	УЖ	УЖ	УЖ
N	10	1*		2	5	10	7	7	1
SiO ₂	38.1(4)	37.1		54.2(3)	54.9(2)	55.6(3)	56.1(5)	54.2(8)	50.9
TiO ₂	н.п.о.	н.п.о.		0.49(1)	0.50(10)	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Al ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.		0.43(6)	-	н.п.о.	н.п.о.	4.19(48)	3.23
Cr ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.		0.75(7)	0.82(9)	н.п.о.	н.п.о.	0.58(9)	0.50
FeO				4.76(37)	5.12(40)	14.2(4)	13.7(7)	9.80(61)	16.1
MnO	0.47(5)	н.п.о.		н.п.о.	н.п.о.	0.48(4)	0.47(6)	н.п.о.	н.п.о.
MgO	38.2(4)	32.1		16.5(2)	17.0(2)	28.6(2)	28.7(6)	28.8(9)	26.2
CaO	н.п.о.	н.п.о.		21.7(5)	20.7(4)	0.79(2)	0.88(21)	1.96(11)	1.96
Na ₂ O	н.п.о.	н.п.о.		0.54(4)	0.63(20)	н.п.о.	н.п.о.	0.57(8)	0.51
Сумма	99.9	99.3		99.4	99.7	99.7	99.9	100.1(1.4)	99.4
O	4	4		6	6	6	6	12	12
Si	1.00	1.01		1.99	2.01	2.00	2.00	3.82	3.74
Ti	-	-		0.01	0.01	-	-	-	-
Al	-	-		0.02	-	-	-	0.35	0.28
Cr	-	-		0.02	0.02	-	-	0.03	0.03
Fe ²⁺	0.51	0.68		0.15	0.16	0.43	0.40	0.58	0.99
Mn	0.01	-		-	-	0.01	0.01	-	-
Mg	1.49	1.30		0.90	0.93	1.53	1.54	3.02	2.86
Ca	-	-		0.86	0.81	0.03	0.03	0.15	0.15
Na	-	-		0.04	0.04	-	-	0.08	0.07
Сумма	3.01	2.99		3.99	3.98	4.00	3.98	8.03	8.13
Фо	74.7	65.6	Эн	47.4	49.0	77.0	77.5	80.7(7)	71.5
Фа	25.3	34.4	Фс	7.7	8.3	21.5	20.8	15.4(9)	24.6
			Вол	44.9	42.7	1.5	1.7	3.9(2)	3.8

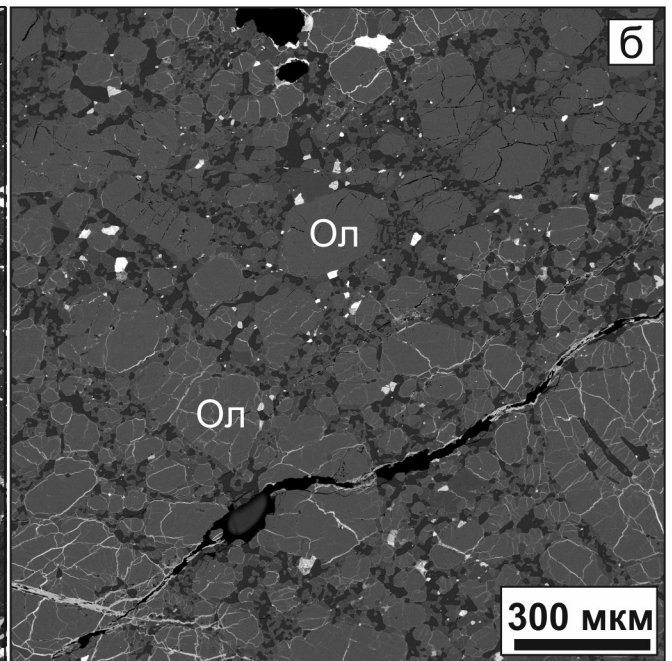
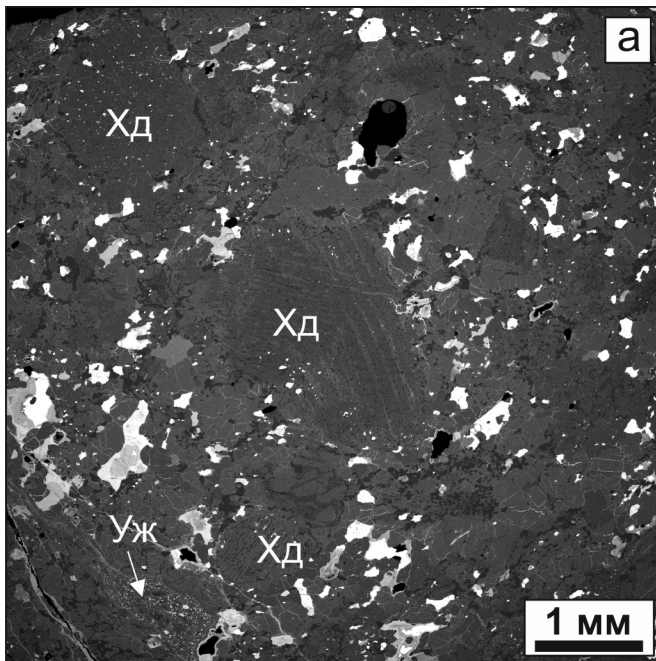
Примечание. В скобках показано стандартное отклонение для последних значащих цифр; N, число анализов; н.п.о., ниже предела обнаружения. *Химический состав зерна рингвудита в левом нижнем углу на рисунке 1б. Фо, форстерит; Фа, фаялит; Эн, энстатит; Фс, ферросилит; Вол, волластонит.

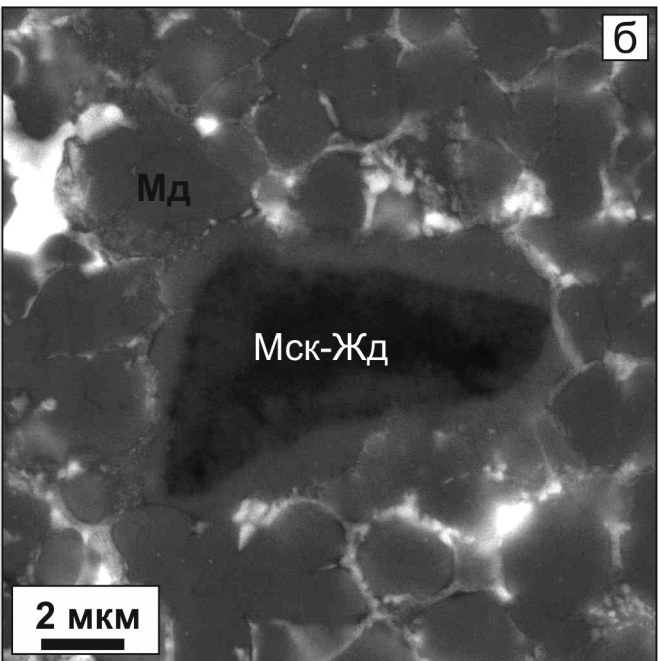
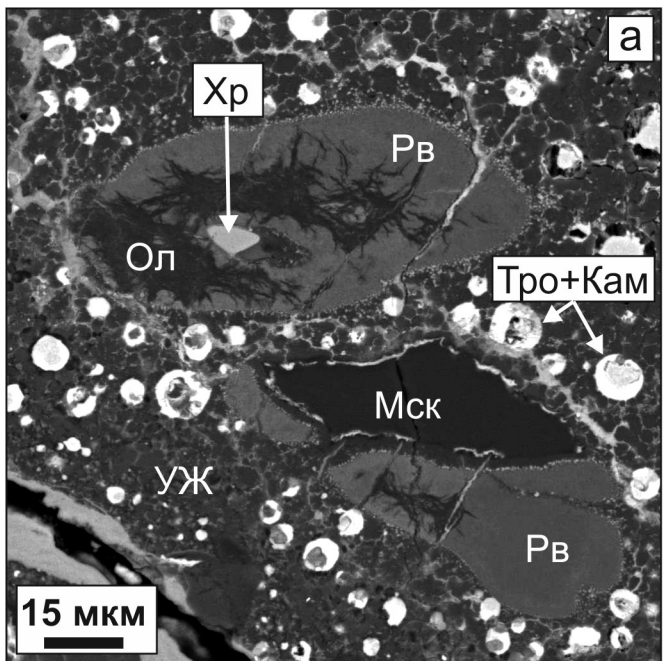
Таблица 2. Средний химический состав (ЭДС, мас.%) маскелинита (Мск) в основной массе (ОМ) и ударно-расплавленной жиле (УЖ), а также областей плагиоклазового состава с жадеитом и стеклом в УЖ.

Фаза	Мск ^а	Мск ^а	Плаг-Жд ^а	Расплав
Положение	ОМ	УЖ	УЖ	УЖ
N	6	2	3	1
SiO ₂	66.1(4)	66.5(0)	62.7(4)	50.9
Al ₂ O ₃	21.2(1)	21.1(0)	18.9(5)	3.23
Cr ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.50
FeO	0.52(8)	0.95(1)	2.86(34)	16.1
MgO	н.п.о.	0.68(25)	4.24(59)	26.2
CaO	1.95(20)	2.89(17)	2.32(10)	1.96
Na ₂ O	9.56(47)	7.28(47)	8.55(14)	0.51
K ₂ O	0.69(26)	0.60(11)	0.39(7)	н.п.о.
Сумма	100	100	100	99.4
O	8	8	8	4
Si	2.90	2.91	2.81	3.74
Al	1.10	1.09	1.00	0.28
Fe ²⁺	0.02	0.04	0.11	0.03
Cr	-	-	-	0.99
Mg	-	0.04	0.28	2.86
Ca	0.09	0.14	0.11	0.15
Na	0.81	0.62	0.74	0.07
K	0.04	0.03	0.02	-
Сумма	4.97	4.87	5.07	8.13
Аб	86.2(1.1)	78.5(5)	85.1(1.3)	
Ан	9.7(1.0)	17.7(3)	12.6(1.9)	
Ор	4.1(1.6)	3.8(3)	2.3(0.5)	

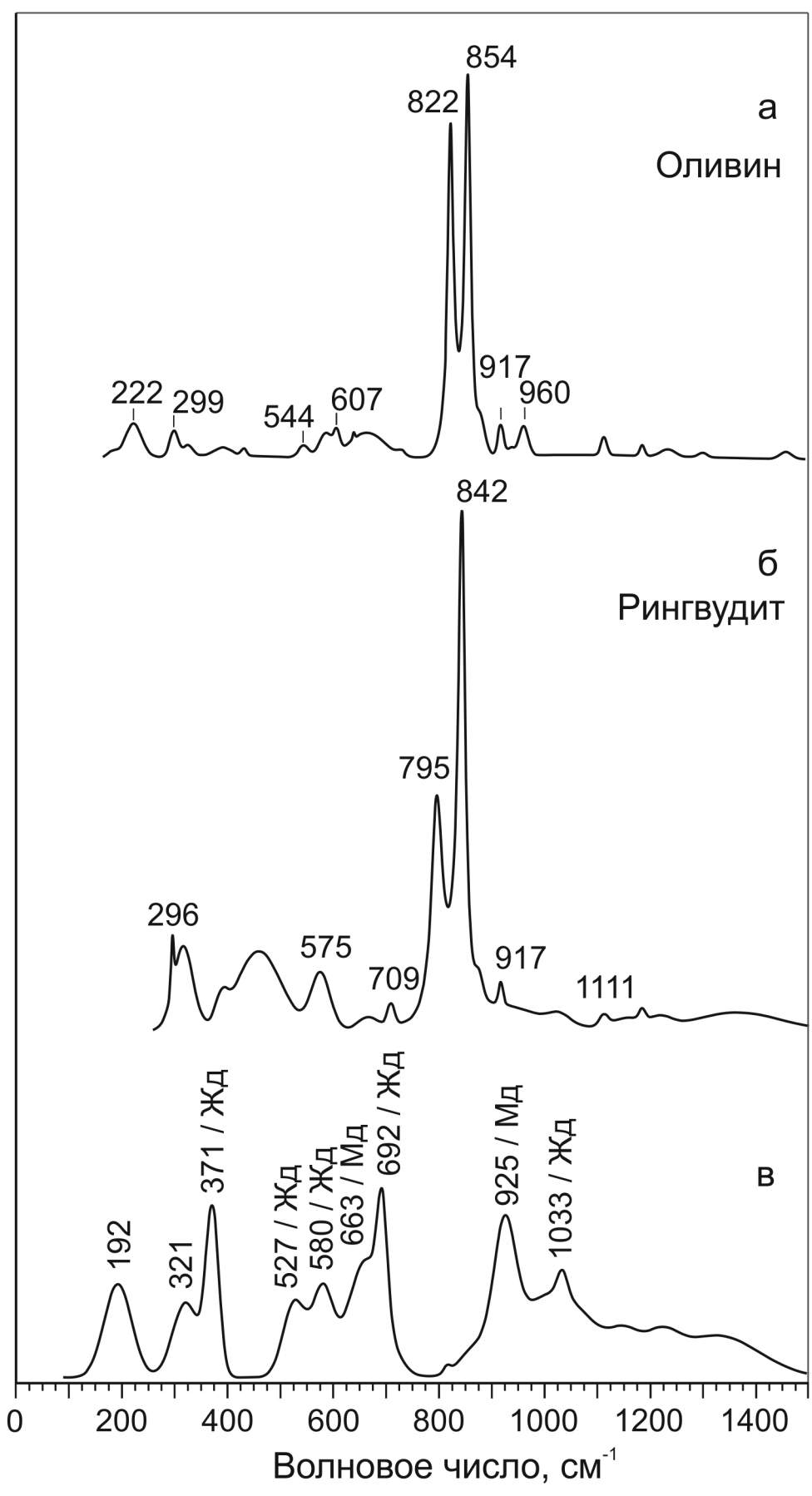
Примечание. В скобках показано стандартное отклонение для последних значащих цифр; N, число анализов; н.п.о., ниже предела обнаружения. ^аХимический состав нормирован к 100% суммы оксидов; Плаг-Жд - область плагиоклазового состава с жадеитом + остаточный аморфный материал; Аб, альбит; Ан, анортит; Ор, ортоклаз. N – число анализов.







Интенсивность, у.е.



ИНТЕНСИВНОСТЬ, у.е.

