

УДК 523.681.5

ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ХОНДРИТОВЫХ МЕТЕОРИТАХ Dhofar 717 И 864

К. Д. Литасов^{1,*}, Д. Д. Бадюков², академик РАН Н. П. Похиленко¹

Поступило 29.05.2018 г.

Приведены результаты спектроскопического исследования ударно-расплавных жил в хондритовых метеоритах группы L6 Dhofar 717 и 864 и сделаны выводы о *PT*-параметрах, зафиксированных в этих метеоритах после ударного события. Первичные минералы основной массы (вмещающей ударно-расплавные жилы) включают оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, хромит, фосфаты, троилит, камасит. Ударно-расплавные жилы толщиной до 1 см содержат фрагменты минералов высокого давления — рингвудита, вадслеита, мэйджорита, акимотоита, жадеита, лингунита, туита и закалённый расплав, состоящий из мэйджорита, рингвудита, троилита, камасита. Минеральные ассоциации хондритов Dhofar 717 и 864 свидетельствуют о высоких пиковых параметрах ударного воздействия в области стабильности мэйджорита (>20 ГПа, >2500 К) и бриджманита (>25 ГПа, >2500 К). Присутствие лингунита также напрямую указывает на пиковые давления в области устойчивости бриджманита.

Ключевые слова: ударно-расплавные жилы, хондриты, оливин, рингвудит, мэйджорит, бриджманит.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524853346-350>

Данные по стабильности высокобарических минералов, найденных в метеоритах, в статических и ударных экспериментах в совокупности с данными по диффузии элементов, кинетике фазовых переходов и датированию ударных событий, позволяют получить первичную информацию для разработки теоретических моделей ударных событий на ранних стадиях образования Солнечной системы [1, 2]. Большинство высокобарических фаз установлено в хондритовых метеоритах, где обнаружены высокобарические модификации оливина — рингвудит, вадслеит, аренсит, ортопироксена — мэйджорит, акимотоит, хемлиит, плагиоклаза — жадеит (+SiO₂), лингунит, апатита — туит, хромита — ксиит [3]. Ряд других минералов высокого давления обнаружен в лунных и марсианских метеоритах. Образование этих минералов связано как с твёрдофазными переходами при ударном воздействии на первичные минералы, так и при прямой кристаллизации из ударного расплава. Один из основных методов идентификации высокобарических минералов в метеоритах — (рамановская) спектроскопия комбинационного рассеяния (КР). В данной работе приведены результаты спектроскопического исследования ударно-расплавных жил в хондритовых метеоритах

группы L6 Dhofar 717 и 864 и сделаны выводы о *PT*-параметрах, зафиксированных в этих метеоритах после ударного события.

Для изучения были выбраны полированные шлифы метеоритов с размером образца 2–3 см. Исследования микроструктуры и состава минералов проводили методом сканирующей электронной микроскопии на приборе “Tescan” MYRA 3 LMU с энергодисперсионной приставкой X-Max-80 “Oxford Instruments” в ИГМ СО РАН, Новосибирск. Условия съёмки: 15 кВ, 1 нА. Спектры калибровали с помощью стандартных образцов силикатов и оксидов. Идентификацию высокобарических минералов проводили с помощью КР-спектроскопии на приборе Horiba “Jobin Yvon” LabRAM HR800 с твёрдотельным лазером с длиной волны излучения 532 нм в ИГМ СО РАН (Новосибирск).

Первичные минералы основной массы, вмещающей ударно-расплавные (УР) жилы, представлены оливином (форстерит 75%, далее Fo_{75}), ортопироксеном (энстатит (Эн) 76–78%, ферросилит (Фс) 20–22%, волластонит (Во) 1–2%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,3$ мас.%), клинопироксеном ($\text{Эн}_{47}\text{Фс}_8\text{Во}_{45}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,5$ мас.%), стеклом плагиоклазового состава (маскелинитом) (альбит (Аб) 84%, анортит (Ан) 10%, ортоклаз (Ор) 6%), хромитом, фосфатами (хлорапатит, мерриллит), троилитом, камаситом.

В основной массе выделяются УР-жилы толщиной до 1 см. Они состоят из фрагментов первичных минералов, в основном преобразованных в высокобарические модификации, и закалённого раскры-

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

² Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: klitasov@igm.nsc.ru

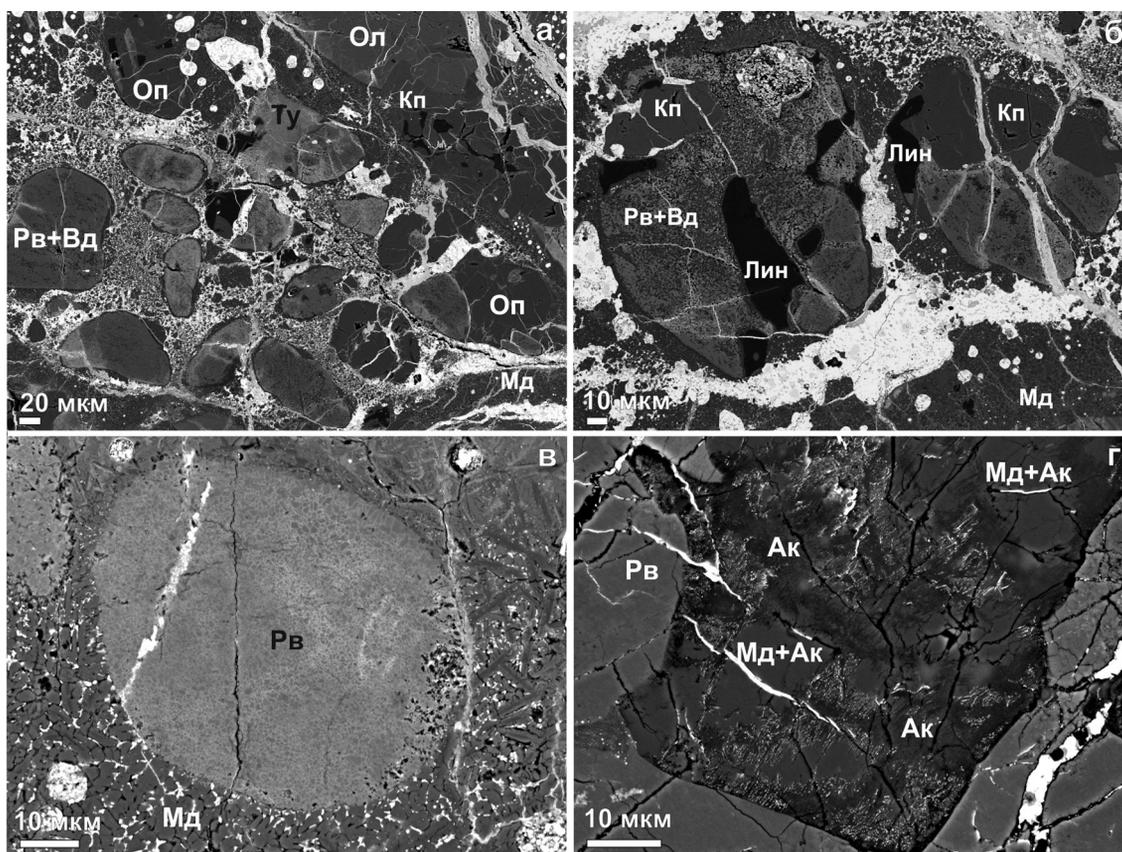


Рис. 1. Выделения минералов высокого давления в хондритах Dhofar 717 (а, б, д) и 864 (в): а — фрагмент ударно-расплавной жилы с включениями рингвудита (Рв), вадслеита (Вд), туита (Ту); б — то же с включениями рингвудита, вадслеита, лингунита (Лин); в — детали тонкой структуры рингвудита; г — подплавленное зерно ортопироксенового состава с зонами акимотоита (Ак) и акимотоита с мэйджоритом (Мд). Ол — оливин, Оп — ортопироксен, Кп — клинопироксен.

сталлизованного расплава, состоящего из силикатов, троилита, камасита (рис. 1а). Большая часть силикатов жил представлена мэйджоритовым гранатом ($\text{Эн}_{70-74}\text{Фс}_{21-25}\text{Во}_{4-5}, \text{Al}_2\text{O}_3 = 3,8-4,9 \text{ мас.}\%, \text{Na}_2\text{O} = 0,5-1,4 \text{ мас.}\%$), рингвудитом (Фo_{66-68}).

Крупные выделения высокобарических минералов встречаются как в пределах самих жил и по их краям, замещая основные минералы хондритов. Оба метеорита содержат относительно крупные зёрна, точнее, микрокристаллические агрегаты (рис. 1б, в), рингвудита фиолетового цвета до 100–200 мкм, которые легко диагностируются в проходящем свете петрографического микроскопа. На рис. 2 показаны КР-спектры рингвудита, вадслеита, жадеита, лингунита, акимотоита, акимотоит-мэйджоритового агрегата (последние два спектра отвечают зонам на рис. 1г).

Рингвудит (Фo_{61-64}) полностью замещает оливин в обломках породы внутри УР-жил. Также он замещает краевые зоны зёрен оливина вдоль жил, проникая на глубину до 1–2 мм. Включения лингунита ($\text{Аб}_{82-84}\text{Ан}_{11-13}\text{Ор}_{5-6}$) соседствуют с рингвудитом

(Фo_{60-68})-вадслеитовыми (Фo_{81-89}) агрегатами (рис. 1б).

В хондрите Dhofar 717 были найдены частично подплавленные зёрна ортопироксена с зонами акимотоита ($\text{Эн}_{80-82}\text{Фс}_{17-19}\text{Во}_1$) и акимотоита с мэйджоритом ($\text{Эн}_{76-77}\text{Фс}_{22-23}\text{Во}_1$), рис. 1г. В хондрите Dhofar 864 также встречены подобные агрегаты. Внутри этих агрегатов обнаружены зёрна с частично аморфизованной структурой, которые похожи на экспериментально синтезированный бриджманит [4]. Однако однозначных доказательств присутствия бриджманита в этих образцах получить пока не удалось. КР-спектр этой фазы не снимается вследствие быстрой аморфизации и выгорания даже при слабой мощности лазера, а для снятия рентгенограммы зёрна слишком мелкие. Следует отметить, что в [5], где был охарактеризован бриджманит из L6-хондрита Tenham (и дано название минерала), доказательства его присутствия весьма спорны. На рентгенограмме, полученной с помощью дифрактометрии на установке синхротронного излучения, авторы выделили 11% бриджманита в зерне

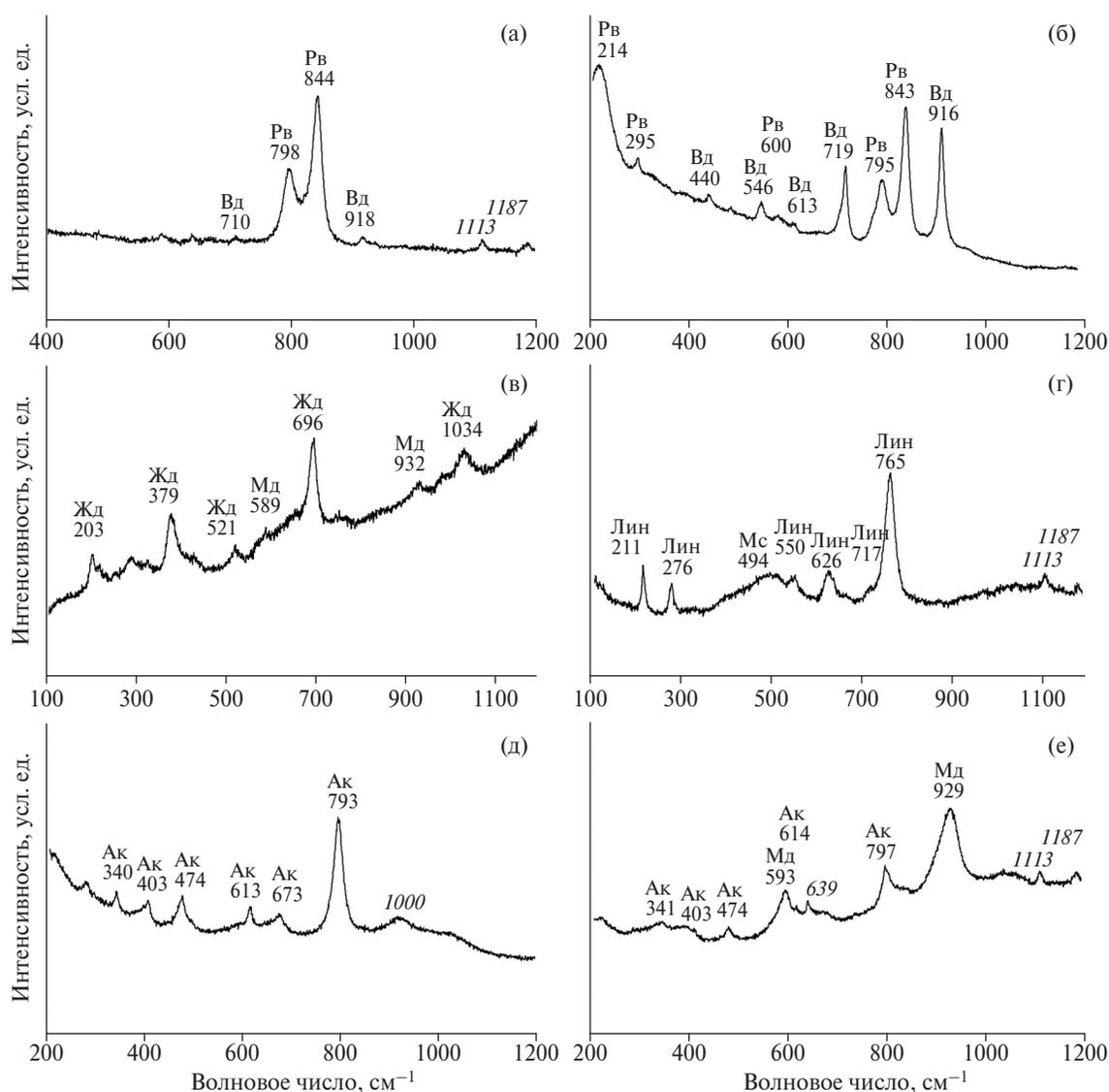


Рис. 2. Представительные КР-спектры минералов высокого давления. Рв — рингвудит, Вд — вадслеит, Жд — жадеит, Мд — мэйджорит, Лин — лингунит, Мс — маскелинит, Ак — акимотоит. Курсивом отмечены неидентифицированные линии.

УР-жилы, игнорируя возможное присутствие мэйджорита. Поэтому 1–2 пика бриджманита, которые видны на рентгенограмме, на наш взгляд, не являются однозначным доказательством находки этого минерала. Тем не менее наличие витрифицированных участков стекла в ударно-метаморфизованных зёрнах ортопироксенового состава указывает на первоначальное формирование бриджманита [6, 7].

Минеральные ассоциации хондритов Dhofar 717 и 864 свидетельствуют о высоких пиковых параметрах ударного воздействия в области стабильности мэйджорита (>20 ГПа, >2500 К) и бриджманита (>25 ГПа, >2500 К) (поля 1 и 2 на рис. 3). Присутствие лингунита (поле 3) практически напрямую указывает на пиковые давления в области устойчивости бриджманита. Поле чистого рингвудита и ас-

социации лингунит + Al-мэйджорит соответствует чуть меньшим давлениям, а ассоциация вадслеит + рингвудит (поле 4) на рис. 3 ограничивает *PT*-параметры интервалом 13–18 ГПа, 2000–2200 К. Высоким давлениям отвечают и ассоциации, показывающие твердофазные переходы ортопироксена в мэйджорит, акимотоит, бриджманит. Наличие акимотоита весьма интересно, так как он является довольно низкотемпературным минералом (20–23 ГПа, 1800–2000 К, поле 5 на рис. 3). Его появление связано с резким сбросом пиковых температур и быстрой кинетикой трансформации бриджманита в акимотоит [8].

Необходимо отметить, что сравнение ассоциаций высокобарических минералов в метеоритах с полями термодинамической стабильности фаз на равновес-

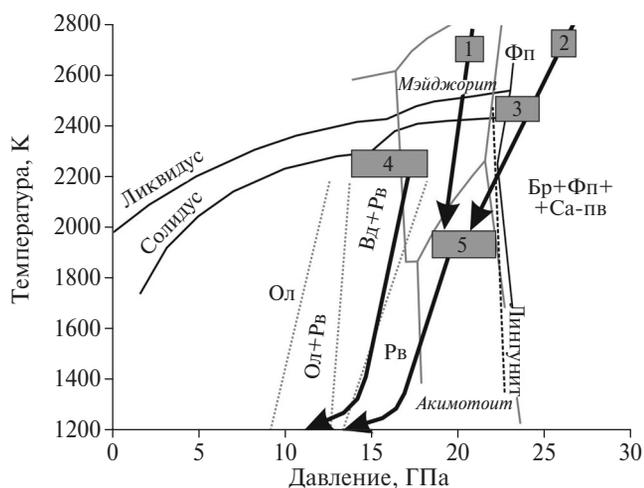


Рис. 3. *P-T*-условия образования фаз высокого давления в исследованных хондритах L6. Стрелки — профили падения давления и температуры после ударного воздействия (серые поля — см. текст). Для сравнения приведены данные по статическим экспериментам: сплошные линии — солидус, ликвидус и переход рингвудит (Рв) = бриджманит (Бр) + ферропериклаз (Фп) для перидотита KLB-1 [12]; точечные линии — фазовые границы Ол/(Ол + Рв) и (Рв + Вд)/Рв для состава (Фо75) [13]; серые сплошные линии — поля стабильности мэйджорита и акимотоита в системе MgSiO₃ [14]; чёрная пунктирная линия — граница перехода жадеит + стишовит = лингунит [15]. Са-пв — Са-перовскит.

ных фазовых диаграммах не совсем корректно. Необходимо учитывать кинетику фазовых превращений, так как длительность ударных процессов в метеоритах составляет 10^{-3} – 10^0 с [1, 9]. Тем не менее сравнение с ударным экспериментом ещё менее информативно, так как формирование высокобарических минералов в них практически не происходит, даже при 60–100 ГПа (например, [10]) вследствие короткой длительности ударного импульса ($\sim 10^{-7}$ с). Потенциально важными являются эксперименты со сферически сходящейся ударной волной [11]. В подобных экспериментах длительность ударного импульса составляет $\sim 10^{-6}$ с с повторными импульсами меньшей интенсивности. В результате в подобных экспериментах с природными горными породами были получены высокобарические фазы, такие как рингвудит и, возможно, бриджманит [11].

Детальная характеристика продуктов экспериментов в сферических ударных волнах — одно из перспективных направлений дальнейших исследований.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 17–05–00851).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gillet P., El Goresy A. // *Annu. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2013. V. 41. P. 257–285.
2. Ohtani E., Kimura Y., Kimura M., Takata T., Kondo T., Kubo T. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 227. P. 505–515.
3. Tomioka N., Miyahara M. // *Meteoritics & Planet. Sci.* 2017. V. 52. P. 2017–2039.
4. Litasov K., Ohtani E., Langenhorst F., Yurimoto H., Kubo T., Kondo T. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 211. P. 189–203.
5. Tschauner O., Ma C., Beckett J.R., Prescher C., Prakapenka V.B., Rossman G.R. // *Science*. 2014. V. 346. P. 1100–1102.
6. Miyahara M., Ohtani E., Ozawa S., Kimura M., El Goresy A., Sakai T., Nagase T., Hiraga K., Hirao N., Ohishi Y. // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2011. V. 108. P. 5999–6003.
7. Tomioka N., Fujino K. // *Science*. 1997. V. 277. P. 1084–1086.
8. Feng L., Miyahara M., Nagase T., Ohtani E., Hu S., El Goresy A., Lin Y. // *Amer. Mineral.* 2017. V. 102. P. 1254–1262.
9. Sharp T.G., DeCarli P.S. // *Meteorites and the Early Solar System II*. Houston: Univ. Arisona Press, 2006. P. 653–677.
10. Stöffler D., Keil K., Scott E.R.D. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 3845–3867.
11. Козлов Е.А., Сазонова Л.В. // *Петрология*. 2012. Т. 20. № 4. С. 334–334.
12. Zhang J., Herzberg C. // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 17729–17742.
13. Akaogi M., Ito E., Navrotsky A. // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 15671–15685.
14. Gasparik T. *Phase Diagrams for Geoscientists. An Atlas of the Earth's Interior*. N.Y.: Springer, 2003. 457 p.
15. Zhou Y., Irifune T., Ohfuji H., Shinmei T., Du W. // *Physi. and Chem. Minerals*. 2017. V. 44. P. 33–42.

FORMATION PARAMETERS OF HIGH-PRESSURE MINERALS IN THE Dhofar 717 AND 864 CHONDRITE METEORITES

K. D. Litasov¹, D. D. Badyukov², Academician of the RAS N. P. Pokhilenko¹

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received May 29, 2018

This paper presents the results of a Raman spectroscopic study of shock melt veins in L6 chondritic meteorites Dhofar 717 and 864, and conclusions about the *PT*-parameters recorded in these meteorites after the impact event. The primary minerals of the host chondrite include olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, chromite, phosphates, troilite, and kamasite. Shock melt veins up to 1 cm thick contain fragments of the high-pressure minerals ringwoodite, wadsleyite, majorite, akimotoite, jadeite, lingunite, and tuite and quenched melt consisting of majorite, ringwoodite, troilite, and kamasite. The mineral associations of the Dhofar 717 and 864 chondrites indicate high peak *PT*-parameters of the impact in the region of stability of majorite (>20 GPa and >2500 K) and bridgmanite (>25 GPa and >2500 K). The presence of lingunite also directly indicates a peak pressure in the area of stability of the bridgmanite.

Keywords: shock melt veins, chondrite, olivine, ringwoodite, majorite, bridgmanite.