

## ФАЗЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В МЕТЕОРИТАХ

*Д. Д. Бадюков*

*Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, badyukov@geokhi.ru*

Фазовые переходы с образованием высокоплотных модификаций минералов или фаз высокого давления (ФВД) протекают либо под воздействием статических давлений в глубинных зонах планет, либо в достаточно интенсивных ударных волнах. Так, например, существование переходной зоны в мантии Земли, отмечающейся на глубинах от 410 до 650 км и характеризующейся разрывами в скоростях сейсмических волн [Anderson, 1989], отчасти (или даже полностью) связано с различными фазовыми переходами, испытываемых оливином и пироксенами. Однако обнаружение природных образцов ФВД, образованных по этим и другим минералам, затруднено в связи с их переходом в низкоплотные фазы при транспортировке мантийного материала с этих глубин к поверхности, т.н. мантийные ксенолиты из кимберлитов содержат лишь продукты распада меджорита на гранат и пироксен (правда, известны единичные находки твердого раствора меджорит – гранат в виде включений в алмазах). Из природных ФВД, образованных при литостатической нагрузке, распространен только коэсит, встречающийся в эклогитах и голубых сланцах. С другой стороны, при высокоскоростных соударениях тел достижимы в принципе сколь угодно высокие давления с последующим их быстрым сбросом, что, при определенных условиях, благоприятствует сохранению ФВД. Действительно, в породах взрывных метеоритных кратеров найдены различные высокоплотные модификации углерода,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ,  $\text{ZrSiO}_4$  и других соединений, впрочем, пользующиеся достаточно ограниченной распространенностью.

Благодаря своей богатой ударной истории метеориты, а в особенности хондриты – космические «осадочные» породы – также содержат различные ФВД, такие как алмаз, высокоплотные модификации кремнезема, полевых шпатов, оливина и низкокальциевого пироксена (табл.). Поскольку ФВД, развивающиеся по последним двум минералам практически не встречаются на Земле, то метеориты представляют единственную возможность их изучения в природе. Различные ФВД достаточно часто присутствуют в L6 хондритах, что позволяет восстановить механизмы их образования и ударную историю хондритов. По формам нахождения ФВД в метеоритах можно выделить две группы – а) более или менее равномерно распределенные в объеме метеорита-хозяина и б) приуроченные и локализованные в ударных расплавленных прожилках, пронизывающих ударно-метаморфизованную массу метеоритов.

*Таблица*

Исходная фаза	Фазы высокого давления
C	чаоит, лонсдейлит → алмаз
$\text{SiO}_2$	коэсит → стишовит → фазы со структурой бадделеита и $\alpha\text{-PbO}_2$
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	водслеит → ( $\zeta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4 \leftarrow$ водслеит) → рингвудит → перовскит+стишовит
$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	рингвудит → вюстит+стишовит
$\text{MgSiO}_3$	меджорит → акимотоит → перовскит
$\text{FeSiO}_3$	рингвудит+стишовит → вюстит+стишовит
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	жадеит+стишовит → лингунит
$\text{Ca}_3\text{PO}_4$	фаза $\text{Ca}_9\text{MgNa}(\text{PO}_4)_7$
$\text{FeCr}_2\text{O}_4$	ксиетит, фаза с орторомбической структурой

Первый тип нахождения ФВД образуется при гомогенном распределении давления и температуры в объеме вещества (при т.н. «равновесном» состоянии в динамическом смысле). К этим ФВД относятся алмазы в уреилитах и фазы кремнезема в шерготтитах. Уреилиты – метеориты, состоящие из оливина и пижонита, содержат также около 3-х % углеродистого вещества. Во многих (если не во всех) уреилитах это вещество полностью или частично превращено в поли типы алмаза, представленных поликристаллическими агрегатами, наследующими морфологию углеродистых выделений [Ferroir et al., 2010]. Полагается, что образование алмазов происходило в ударных волнах, поскольку интенсивность ударного метаморфизма в уреилитах (планарная трещиноватость в минералах и развитие мозаичности, перекристаллизация оливина) свидетельствует о давлениях в ударной волне превышающих 20 ГПа, т.е. в условиях, при которых достаточно эффективно происходит синтез алмазов, как это следует из экспериментальных данных. Метеорит Шерготти (марсианский базальт) был подвержен ударным давлениям в районе 45 ГПа, что привело к фазовым переходам в зернах кремнезема, которые представлены агрегатами стишовита, ФВД кремнезема со структурой  $\alpha$ - $\text{PbO}_2$  и бадделеита, а также кристобалита [El Goresy et al., 2000]. Очевидно, что эти закалочные фазы возникли на разных стадиях ударной нагрузки, характеризующимися разными P-T условиями, причем весь цикл нагрузки был осуществлен за очень короткое время – порядка  $10^{-n} \times 10$  мсек.

Второй тип нахождения ФВД наблюдается в обыкновенных хондритах и марсианских метеоритах. Для некоторой части этих метеоритов, составляющей около 1 % от их общего числа, характерны черные (из-за рассеянных капелек металла и троилита) прожилки, сложенные ударным расплавом. Они имеют толщину порядка от 1–3 мм до микрона и образуют хаотичную сеть в объеме породы. Эти прожилки сложены тонко раскристаллизованным расплавом, вмещающим моно- и полиминеральные фрагменты вещества метеорита-хозяина.

Наибольшим распространением прожилки пользуются в ударно-метаморфизованных L6 хондритах, где они достаточно часто содержат ФВД. В прожилках различаются две генерации ФВД: а) входящие в состав расплавной матрицы; б) находящиеся в обломках в матрице прожилков и в областях, прилегающих к прожилкам [Ozava et al., 2009]. Основные ФВД в L6 хондритах представлены для  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  – водслеитом и рингвудитом (структуры  $\beta$ - и  $\gamma$ -шпинелей соответственно),  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  – меджоритом, акимотоитом (структура ильменита) и фазой со структурой перовскита, фосфат –  $\text{Ca}_9\text{MgNa}(\text{PO}_4)_7$  – фазой со структурой  $\gamma$ - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  – лингунитом (фазой с голландитоподобной структурой),  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  – фазы с орторомбической структурой (ксиетит). Образовавшиеся по минеральным обломкам ФВД, как правило, характеризуются составом, идентичным составу исходного минерала, что свидетельствует о высокобарном переходе в твердом состоянии, тогда как меджорит в расплавном матриксе характеризуется повышенными содержаниями Na, Al и Ca.

Вещество метеоритов с расплавными прожилками, содержащими ФВД, как это следует из интенсивности ударных эффектов в плагиоклазе и оливине, не подвергалось ударным давлениям выше 45 ГПа, а, скорее всего, испытало нагрузку в районе 30–40 ГПа, имеются примеры, когда в метеоритах, содержащих ФВД, плагиоклаз полностью не трансформируется в маскелинит, а характеризуется сильной потерей двупреломления и содержит планарные деформационные структуры, что свидетельствует о нагрузке порядка 27 ГПа. Расчеты температуры ударного сжатия показывают, что она при этом диапазоне нагрузок лежит в пределах 500–700 К. Эксперименты по плавлению метеорита Алленде [Agee et al., 1995] и перидотита при высоких давлениях показывают, что их ликвидус при этих давлениях лежит в диапазоне 2500–2800 К, что примерно в 4 раза превышает «равновесную» ударную температуру. Подобные «горячие» зоны могут образовываться в адиабатических полосах скольжения на фронте проходя-

щей ударной волны. Нами полагается, что вследствие быстрого теплообмена между стенками прожилка и расплавом в условиях существования высокого давления происходит его кристаллизация. Одновременно или несколько позже высокие температуры инициировали в окрестностях прожилков твердофазовые переходы оливина и пироксена в рингвудит и меджорит (ФВД второй генерации). Количественные оценки охлаждения прожилков толщиной 1 и 2 мм показали, что их охлаждение до 800 К происходит в течении 0.4 и 1.2 сек. соответственно. Очевидно, что увеличению скорости твердофазной трансформации минералов в ФВД в весьма большой степени способствовали высокие температуры. В метеорите Dho 922 наблюдались класты, находящиеся в расплавной матрице и состоящие из оливинового ядра и рингвудитовой мантии, окаймленной в свою очередь агрегатом зерен размером меньше микрона, причем в ее состав входит (Fe,Mg)O. Представляется вероятным, что эта каемка возникла в первые десятки миллисекунд при давлениях порядка 23–25 ГПа за счет реакции разложения оливина на фазу с перовскитовой структурой и магнезиовюстит, которая при падении давления в волне разгрузки сменилась трансформацией оливина в рингвудит, причем состав оливина более магнезиален (среднее  $Fe_{9.5}$ ), чем рингвудит (среднее  $Fe_{40.5}$ ). Рассчитанное распределение Mg и Fe между оливином и рингвудитом совместно с их составами дает возможность оценить температуру реакции около 1200–1000 К.

Таким образом, можно полагать, что образование ФВД в ударных прожилках протекает на всех стадиях ударной нагрузки – начиная от пиковых давлений (образование перовскитоподобной и ильменитоподобной фаз в кластах), в течение спада давления (кристаллизации магнезиовюstitа и твердого раствора меджорит – гранат, начало твердофазного перехода низкокальциевого пироксена в меджорит и оливина в рингвудит), а также в хвосте волны разгрузки (образование водслеита). При этом благодаря разным скоростям охлаждения прожилка из-за его разной начальной температуры и толщины и закалке, существует возможность наблюдать «замороженные» ассоциации различных ФВД, образованных на различных стадиях ударного сжатия. Дальнейшие исследования этих процессов могут быть полезны для разработки схем ударно-волнового синтеза ФВД (при этом обращает на себя внимание необычайно высокая скорость фазовых переходов, протекающих вероятно по диффузионному механизму), а также для решения проблем минералогии мантии Земли.

*Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-05-00444а и Программы ОНЗ-5 РАН.*

### Литература

- Anderson D. L.* Theory of the Earth. Blackwell Scientific Publications, 1989. 366 p.  
*El Goresy A. et al.* A monoclinic post-stishovite polymorph of silica in the Shergotty meteorite // Science. 2000. V. 288. P. 1632–1634.  
*Ferroir T. et al.* Carbon polymorphism in shocked meteorites: Evidence for new natural ultrahard phases // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 290. P. 150–154.  
*Ozava S.* 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 & Planetary Science. 2009. V. 44. P. 1771–1786.  
*Agee C. B. et al.* Pressure–temperature phase diagram for the Allende meteorite // Journal of Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 17,725–17,740.