

УДК 532.12+532.593

О ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ В ПИРОКСЕНИТЕ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

С. А. Бордзиловский^{1,3}, С. М. Караханов¹, А. И. Туркин², А. С. Юношев^{1,3},
В. М. Титов¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru²Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090 Новосибирск³Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Исследовано ударное нагружение образцов природного пироксенита и образцов синтетического пироксена, спеченного из смеси оксидов со стехиометрией $Mg_{0.9}Fe_{0.1}SiO_3$. Проведен рентгенофазовый анализ сохраненного вещества. Зарегистрированные при помощи лазерной интерферометрии профили массовой скорости указывают на существование фазового перехода при давлении ≈ 60 ГПа. При этом давлении лагранжева скорость звука в ударно-нагруженных образцах природного пироксенита составляет 13.9 км/с. Приведена оценка сжатия, в соответствии с которой значение эйлеровой скорости звука равно 9.4 км/с.

Ключевые слова: ударные волны, пироксенит, пироксен, фазовый переход, VISAR, лазерная интерферометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные исследования ударной сжимаемости минералов в течение последних десятилетий стимулированы возможностью достижения давлений и температур, сопоставимых с условиями, существующими в мантии Земли вплоть до ее границы с ядром. Этот огромный массив данных, полученных, например, в работах [1–9], систематизирован в справочниках [10–12]. В результате изучения ударной сжимаемости минералов во многих из них обнаружены фазовые переходы, которые идентифицируются как на ударных адиабатах, так и на профилях давления или массовой скорости. Так, авторы [3] указывали, что во всех исследованных ими минералах происходят изменения, связанные с фазовыми превращениями. Изучение структуры фронтов ударных волн в этой работе проведено с использованием манганиновых датчиков и электромагнитной методики.

Особый интерес проявляется к минералам, которые имеют полиморфные модификации, образующиеся при высоком давлении: вадслеит, мейджорит, рингвудит, перовскит. Исследование поведения таких минералов при ударно-волновом воздействии расширяет пред-

ставления о кинетике импактного минералообразования, связанной с энергетическими характеристиками метеоритных объектов.

Так, в работах [13, 14] установлено, что кристаллы вадслеита микронных размеров возникают меньше чем за 1 мкс при ударном давлении 26 ГПа и температуре $2000 \div 3000$ К, при этом их образование при ударно-волновом нагружении происходит скорее в результате расплава, чем перехода твердое — твердое. Следовательно, этот минерал мог образовываться при столкновении метеоритов, размер которых находится в метровом диапазоне, а не в километровом, как это предполагалось раньше. С другой стороны, детальное изучение свойств высокобарических фаз, особенно перовскита, могло бы объяснить особенности распространения сейсмических волн в мантии Земли и, следовательно, подтвердить или опровергнуть те или иные гипотезы о ее составе [15]. Авторы [4] отмечали необходимость изучения поведения силикатов в связи с «возможностью образования под давлением перовскитовых структур у ряда соединений, в частности у магнезиальных силикатов». Поэтому они подчеркивали важность получения прямых данных о сжимаемости и самого перовскита. При исследовании искусственных образцов перовскита установлено, что он является наименее сжимаемым веществом из использованных в этой работе минералов. Отмечены особенности его адиабаты — плавная монотонно возрас-

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-247.2012.1).

© Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Туркин А. И., Юношев А. С., Титов В. М., 2013.

тающая зависимость до давления 80 ГПа, выше которого наблюдается «сравнительно резкое увеличение плотности (фазовый переход)», при этом значение скачка относительно невелико.

Неоднократно предпринимаемые попытки синтеза высокобарических фаз ударно-волновым воздействием на образец всегда были сопряжены с трудностями, следующими из условий постановки экспериментов при высоких давлениях. Кроме уже отмеченных выше результатов по получению вадслеита в плоских ударных волнах, проводились опыты с нагружением сферических образцов сходящейся ударной волной [16, 17], в которых обнаружены рингвудит и высокобарическая фаза пироксенового состава (возможно, силикат-перовскит). Первые кристаллы рингвудита микронного размера появлялись уже в зоне, где давление составляло 20 ГПа, а в зонах, где давление было выше, их размер возрастал.

В количественном отношении важным минеральным компонентом глубинных пород являются пироксены и их полиморфные модификации. Пироксены — семейство широко распространенных породообразующих силикатных минералов. Они составляют более 20 об. % каменного материала, слагающего верхнюю мантию Земли. Общая структурно-химическая формула пироксенов $A_{1-p}(B, C)_{1+p}[Z_2O_6]$, где $A = Ca, Na$; $B = Mg, Fe^{2+}, Mn, Ni$; $C = Al, Fe^{3+}, Ti, Cr$; $Z = Si, Al, Ti$. В зависимости от состава и упорядочивания катионов пироксены могут иметь ромбическую или моноклинную симметрию кристаллической структуры. Пироксенит — это горная порода, состоящая в основном из ромбического и/или моноклинного пироксена с небольшой примесью других минералов: оливина, роговой обманки, плагиоклаза, биотита. Химический состав пироксенитов различен. Они содержат $43 \div 53$ % SiO_2 , $4 \div 10$ % Al_2O_3 , $5 \div 13$ % $FeO + Fe_2O_3$, $13 \div 24$ % MgO и $9 \div 20$ % CaO . Изучение состояния пироксенов при высоких давлениях и температурах представляет интерес с точки зрения их поведения в мантии Земли. Как отмечают авторы [6], согласно пиrolитовой и эклогитовой петрологическим моделям состава верхней мантии, модальное содержание пироксенов в ней достигает $15 \div 18$ и 40 % соответственно. В нижней мантии фазы пироксенового состава занимают от 40 до 80 % объема. Это обуславливает актуальность исследования пироксенов метода-

ми ударно-волнового нагружения «как для понимания процессов ударного метаморфизма в лунных габбро и базальтах, так и для определения строения мантии планет земного типа».

Интересные результаты получены в работе [18], в которой измерялась скорость звука в образцах энстатита при различных давлениях. При давлении 64 ГПа наблюдалось резкое увеличение скорости звука, которое регистрировалось вплоть до 83 ГПа, где скорость звука испытывала отрицательный скачок. Подъем скорости авторы интерпретировали как полный переход энстатита в перовскит в этом диапазоне давлений, а последующее уменьшение скорости звука — как переход в новую фазу перовскита высокого давления. Кроме того, авторы указали, что если изменение удельного объема при переходе энстатита в фазу перовскита еще может быть зафиксировано при определении ударной адиабаты, то при переходе из фазы перовскита в новую фазу перовскита высокого давления это изменение столь мало, что может быть зафиксировано только путем регистрации скорости звука.

Мы не ставили себе целью проанализировать основные имеющиеся в литературе данные по изучению поведения минералов при ударно-волновом нагружении (их объем слишком велик). Обзор литературы выполнен с целью показать, что далеко не все вопросы в области процессов образования фаз высокого давления и их свойств хорошо изучены.

Настоящая работа в определенной степени стимулирована данными, полученными в [15, 18]. Естественно, наиболее убедительным доказательством фазовых переходов, происходящих при ударном нагружении, служит обнаружение высокобарических фаз в веществе, сохраненном после эксперимента. Поэтому была проведена серия опытов по сохранению силикатного материала после ударного нагружения, с тем чтобы выявить и исследовать фазовый переход при высоком давлении. Кроме того, обнаружение фазово-химических превращений в веществе возможно при записи профилей давления или массовой скорости. В настоящей работе для этого использована методика регистрации массовой скорости при помощи лазерного интерферометра. Применение методики, регистрирующей структуру волны в образце, позволяет избежать экранировки пластической волны сжатия упругой волной в области, где существование последней еще возможно [3], в

Таблица 1

Микрозондовый анализ клинопироксена и оливина из образца пироксенита (осредненные значения)

Материал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₂	MnO	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма, %
Клинопироксен	52.16	0.13	2.51	0.14	0.171	4.52	15.94	23.27	0.133	0.005	98.98
Оливин	38.41	0.00	0.00	0.01	0.36	19.73	42.41	0.03	0.03	0.01	100.98

том случае, если используются измерения электроконтактными датчиками.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Анализ сохраненного вещества

В качестве материала для экспериментов использовали среднезернистый пироксенит из Урэгнурской вулканоплутонической ассоциации Западной Монголии. Это магматическая ультраосновная порода, состоящая преимущественно из зерен клинопироксена (более 80 %) различного размера (0.1 ÷ 3 мм) и продуктов его изменения — хлорита и амфибола. Зерна обычно имеют неровные границы. Кроме того, в породе присутствуют в небольших количествах оливин и плагиоклаз, последний — в виде отдельных реликтов (табл. 1). Образцы в форме таблетки были вырезаны из одного куска породы. Плотность образцов составляла 3.06 г/см³. Микрозондовый анализ минералов выполнен на рентгеновском микроанализаторе САМЕСА MS46 с энергодисперсионным спектрометром, результаты приведены в табл. 1. Содержание основных компонентов в пироксените (SiO₂, MgO, FeO, Al₂O₃) близко к таковому в образцах, использованных в [15].

Для сравнения, кроме природного пироксенита, исследованы образцы синтетического пироксена, спеченные на аппарате «поршень-цилиндр» [19] из смеси оксидов со стехиометрией Mg_{0.9}Fe_{0.1}SiO₃ при давлении 0.3 ГПа и температуре 1000 °С за 19 часов в графитовой ампуле, обеспечивающей окислительно-восстановительные условия устойчивости двухвалентного железа. Состав выбирали исходя из железистости Fe/(Fe + Mg), характеризующей мантийные пироксены. Образцы нагружали в медных ампулах сохранения дюралюминиевыми ударниками, которые разгонялись взрывными системами. В результате циркуляции ударных волн в ампулах достигалось давление ≈50 и

Таблица 2

Характеристики образцов и условия экспериментов с сохранением материала

Номер опыта	Исходный материал	Размеры, мм		p, ГПа
		диаметр	высота	
1	Природный пироксенит	39.7	3.0	50
2	—//—	19.7	3.3	100
3	Синтетический Mg _{0.9} Fe _{0.1} SiO ₃	17.8	3.6	50
4	—//—	17.5	3.9	100

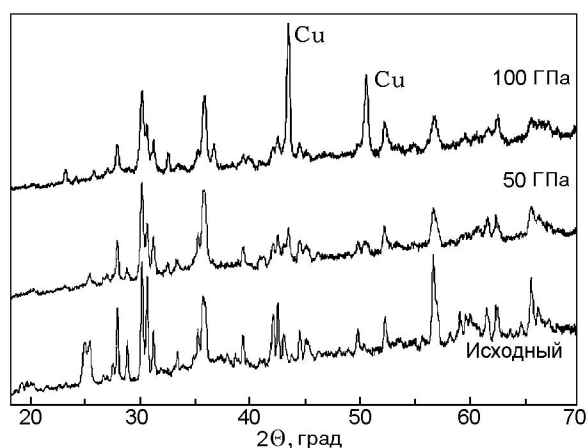


Рис. 1. Дифрактограммы исходного пироксенита и продуктов, полученных при ударном нагружении до 50 и 100 ГПа

100 ГПа. Характеристики образцов и условия экспериментов представлены в табл. 2.

Рентгеновское исследование образцов в исходном состоянии и после нагружения проведено на дифрактометре D8 GADDS (Bruker) в интервале углов 2θ, равном 10 ÷ 70°, излучение CuK_α. По причине взаимного наложения рефлексов от нескольких фаз на дифрактограмме исходного пироксенита (рис. 1) трудно однозначно судить о полном минеральном составе породы. Преобладающим компонентом, судя по

пикам с максимальной интенсивностью, является клинопироксен. Присутствуют также отражения оливина и продуктов вторичного поверхностного изменения — вероятно, амфибола и хлоритов. В исходном образце синтетического пироксена зафиксирована небольшая примесь оливина — около 10 %.

Материал, полученный после ударного воздействия как на природные, так и на синтетические образцы, показал уширение пиков при уменьшении их интенсивности, причем изменяется и относительная интенсивность соответствующих пиков. Эта тенденция усиливается при росте давления от 50 до 100 ГПа и, вероятно, связана с некоторой аморфизацией исходных кристаллических фаз. Отметим, что в образце из опыта, проведенного при 100 ГПа, зарегистрирована медь, привнесенная из ампулы сохранения (см. рис. 1). Высокобарические фазы в продуктах экспериментов не зафиксированы. Возможно, это связано с обратным переходом фаз высокого давления при быстрой разгрузке либо требуется привлечение дополнительных более чувствительных методик для их обнаружения.

В связи с тем, что сохранить высокобарические фазы очень сложно, большую роль в идентификации процесса фазового перехода и его временных параметров играют методы контроля динамических параметров. Во введении уже отмечалось, что эти методы использовались для регистрации профилей давления и массовой скорости в веществах, претерпевающих фазовый переход при ударном нагружении. В настоящей работе для этой цели использовалась регистрация массовой скорости в образцах.

Регистрация ударной и массовой скоростей

Постановка опытов показана на рис. 2. Скорость ударной волны (УВ) в образцах регистрировали манганиновыми датчиками. При нагружении ударником из Д16 толщиной 8 мм со скоростью 3.5 ± 0.1 км/с один датчик размещали между дюралюминиевым экраном (толщина 4.0 мм) и образцом пироксенита (толщина 3.98 мм, размер 30×30 мм), а второй — между образцом пироксенита и поддерживающей пластиной из полиэтилена (толщина 2 мм). При этом регистрировались давление в образце и скорость УВ. Профили давления представлены на рис. 3. Время пробега УВ по образцу определяли по началу переднего

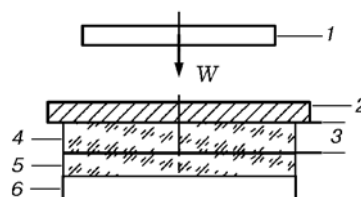


Рис. 2. Постановка опытов по измерению скорости ударной волны:

1 — ударник, 2 — экран, 3 — манганиновые датчики, 4 — пироксенит, 5 — пироксенит или полиэтилен (2 мм), 6 — поддон (фторопласт)

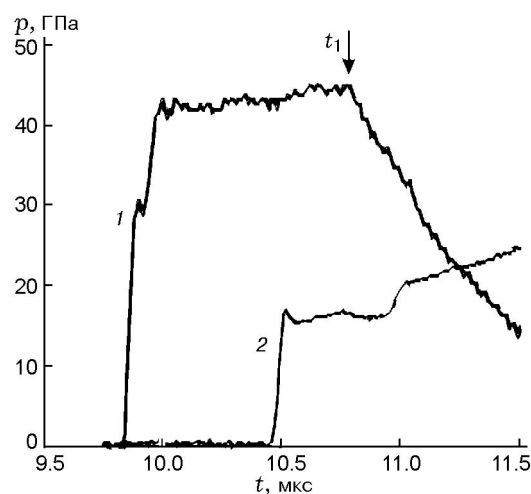


Рис. 3. Профили давления:

1 — на границе экран — пироксенит, 2 — на границе пироксенит — полиэтилен

фронта с учетом времени прохождения УВ по изоляции датчиков. На переднем фронте первого профиля (кривая 1 на рис. 3) видна задержка, связанная с установлением давления в изоляции датчика. После достижения давления 42 ГПа оно держится практически постоянным в течение ≈ 0.5 мкс, а затем слабо нарастает до 45 ГПа. В момент t_1 (отмечен стрелкой) следует резкий спад давления, вызванный прибытием волны разрежения от границы образец — полиэтилен. Амплитуда волны на втором профиле (кривая 2 на рис. 3) значительно меньше $p \approx 16$ ГПа, так как УВ выходит из пироксенита в полиэтилен толщиной 2 мм и остается на этом уровне в течение ≈ 0.5 мкс. После этого виден подъем давления, связанный с отражением волны от фторопластового поддона. Измеренная скорость УВ по образцу пироксенита при $p \approx 35$ ГПа составила 7.3 ± 0.15 км/с.

При нагружении ударником из Д16 толщи-

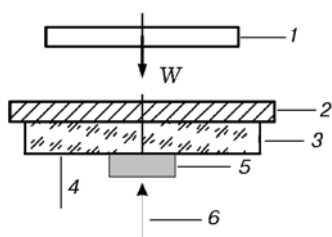


Рис. 4. Постановка опытов по регистрации профилей массовой скорости:

1 — ударник, 2 — экран, 3 — образец, 4 — алюминиевая фольга, 5 — окно LiF, 6 — луч лазера

ной 5 мм датчики служили только отметчиками времени. Толщина экрана была равна 3 мм, при этом толщина образца (4 на рис. 2) 8.28 мм, а его диаметр 23.3 мм, толщина поддерживающей пластины из пироксенита (5) 4.9 мм. Для уменьшения влияния боковой разгрузки образец вклеен эпоксидной смолой в обойму из Д16 диаметром 64 мм. Скорость УВ составила 7.85 ± 0.2 км/с, давление в образце $p \approx 61$ ГПа.

Для определения профилей массовой скорости в образцах использовали лазерный интерферометр Valyn VISAR [20]. Схема постановки экспериментов показана на рис. 4. Материал ударника и экрана — дюралюминий марки Д16Т, толщина 5 и 3 мм соответственно. Толщину образцов пироксенита меняли от 3.43 до 8.46 мм. Поверхности вырезанных образцов полировали. При толщине образцов ≈ 3.5 мм диаметр составлял 23.3 или 33 мм. При больших толщинах диаметр составлял 23.3 мм, и в этих экспериментах образцы также вклеивали в дюралюминиевую обойму. На тыльную поверхность образца наклеивали алюминиевую фольгу толщиной 12 мкм, от которой отражался луч лазера. Фольга была закрыта окном из LiF.

Полученные профили массовой скорости при различных условиях нагружения показаны на рис. 5. Положение профиля 2 относительно профиля 1 на рис. 5, б определено исходя из скорости ударной волны в образце пироксенита, измеренной манганиновыми датчиками (см. выше), и разницы в толщинах образцов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ударные адиабаты пироксенита (энстатитовая горная порода) [1], энстатита [12], дюралюминия и LiF [10], а также пироксена из

работы [15] показаны на рис. 6. В [15] образцы готовили путем горячего прессования из размолотого природного энстатита плотностью 3.26 г/см³. В результате были получены образцы небольшой пористости 6.35 %, плотность которых 3.06 г/см³ совпадает с плотностью образцов в наших экспериментах.

Поскольку ударная адиабата использованного в настоящей работе природного пироксенита в литературе отсутствует, сопоставление измеренных значений скорости УВ проводили с данными [1, 6, 15]. На рис. 6 нанесены две точки для наших образцов: нижняя — результат одновременного измерения скорости и давления манганиновыми датчиками, верхняя — измерение скорости УВ манганиновыми датчиками и массовой скорости лазерным интерферометром. Эти точки лежат несколько выше ударной адиабаты пироксена из [15], что вполне естественно, так как в [15] эксперименты проводи-

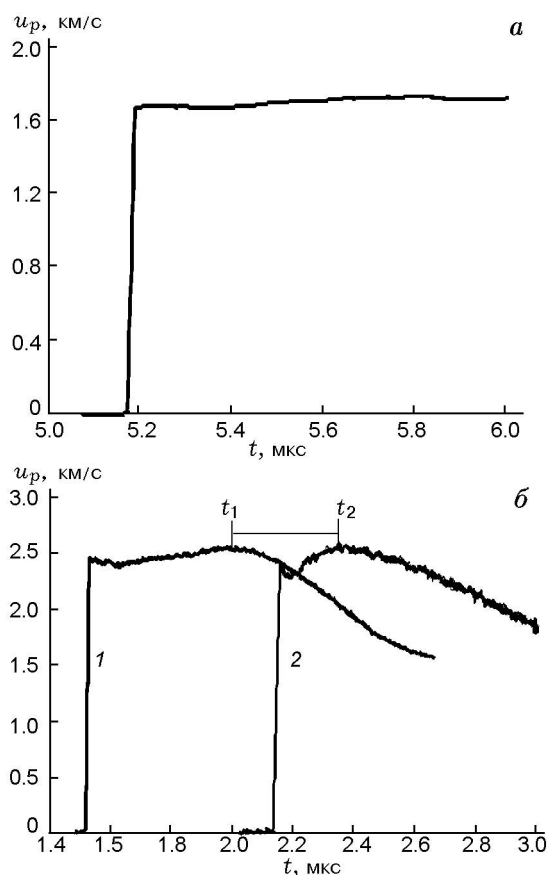


Рис. 5. Профили массовой скорости на границе пироксенит — окно из LiF:

а — $p \approx 35$ ГПа, толщина образца 3.8 мм; б — $p \approx 61$ ГПа, толщина образца: 1 — 3.56, 2 — 8.28 мм

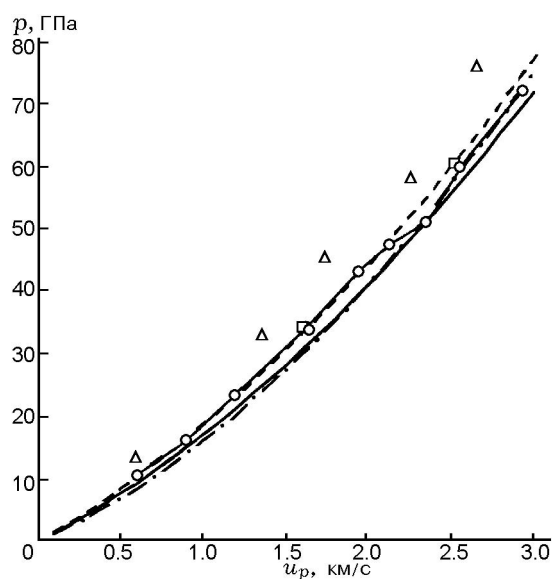


Рис. 6. Ударные адиабаты:

треугольники — пироксенит (энстатитовая горная порода) [1], кружки — энстатит (керамика) [12], штриховая линия — D16 [10], штрихпунктирная — пироксенит [15], сплошная — LiF [10], квадраты — наши данные

лись с прессованными образцами, но ниже точек, полученных в экспериментах [1] с образцами энстатитовой горной породы плотностью 3.29 г/см^3 , очевидно, более «жесткой», чем материал образцов, использованных в наших опытах.

Ударные адиабаты пироксенита и LiF близки (см. рис. 6), поэтому массовая скорость границы раздела образец — окно практически равна массовой скорости внутри образца. При нагружении пироксенита до давления 37 ГПа (см. рис. 5, а) какие-либо заметные особенности на профиле массовой скорости отсутствуют. С увеличением давления нагружения до 61 ГПа ситуация меняется. Уже на первом профиле при толщине образца 3.56 мм (см. рис. 5, б) видна сложная структура волны: за ударным фронтом с амплитудой $u_p = 2.45 \text{ км/с}$ ($p \approx 59 \text{ ГПа}$) за 75 нс происходит слабый спад давления до $u_p = 2.38 \text{ км/с}$ (57 ГПа) и затем в течение 390 нс его рост до максимального значения $u_p = 2.55 \text{ км/с}$ (61 ГПа). После этого из-за действия тыльной волны разрежения массовая скорость постепенно снижается. При увеличении толщины образца до 8.28 мм (см. рис. 5, б, профиль 2) практически при той же амплитуде ударного фронта $u_p = 2.39 \text{ км/с}$ ($p \approx 57 \text{ ГПа}$) спад массовой скорости до $u_p =$

2.30 км/с (55 ГПа) проходит уже за 20 нс, а рост до максимального значения $u_p = 2.55 \text{ км/с}$ (61 ГПа) — за 190 нс.

Расщепление ударной волны обычно обусловлено или переходом от упругого к пластическому деформированию [21], или фазовым переходом в веществе образца, например графит — алмаз [22]. Подробный анализ вида профилей массовой скорости/давления представлен в [23]. Для большинства твердых материалов упругий предел Гюгонио не превосходит 20 ГПа, хотя есть ряд материалов, для которых он выше. Так, в [3] отмечается, что на микроклине переход от упругого к пластическому сжатию происходит в диапазоне $3.5 < p < 40 \text{ ГПа}$. По-видимому, наиболее высокие значения предела упругости (не считая кристаллического алмаза [24]) зарегистрированы при ударном нагружении образцов кубического нитрида бора, который в зависимости от структуры испытывавшихся образцов находился в пределах $31 \div 49 \text{ ГПа}$ [25]. В то же время в работе [6] анализ экспериментов показал, что упругий предел Гюгонио для образцов природного энстатита составляет 6.7 ГПа. Это предположение подтверждает и форма профиля массовой скорости при меньшем давлении (см. рис. 5, а), на фронте которого нет особенностей, характерных для упругого деформирования.

В диапазоне $p = 13.5 \div 34 \text{ ГПа}$ вещество образца, по мнению авторов [6], представляет собой смесь исходного энстатита и фазы высокого давления, а при еще более высоких давлениях — вещество, полностью трансформировавшееся в фазу высокого давления. Исходя из этого следует, что образование двухволновой структуры профилей в наших экспериментах связано с фазовым переходом, начинающимся при $p \approx 57 \div 59 \text{ ГПа}$, а не с переходом от упругого деформирования к пластическому. Формирование стационарного профиля волны требует определенного времени для фазового перехода, поэтому с увеличением толщины образца форма профиля меняется. В работе [2] подчеркивается необходимость увеличения толщины образца, чтобы можно было говорить о завершении фазового перехода, так как для него требуется конечное время.

После того как получены профили массовой скорости при различных толщинах образцов и известна скорость УВ в них, можно определить лагранжеву скорость звука в ударно-

Таблица 3
 Параметры ударно-сжатых образцов

Образец	ρ_0 , г/см ³	p , ГПа	σ	Источник
Прессованный пироксенит	3.06	61	1.523	[15]
Пироксенит	3.29	58.4	1.403	[1]
Энстатитовое габбро	3.15	72.4	1.485	[1]
Бронзит с содержанием энстатита 84.6 %	3.27	60.6	1.416	[11]
Энстатит Mg ₂ [Si ₂ O ₆] (керамика)	3.007	61	1.493	[12]

сжатом образце по времени прихода тыльной волны разрежения. В условиях наших экспериментов импедансы пироксенита и окна из LiF практически совпадают. Это означает, что после отражения УВ от окна состояние образца остается неизменным, следовательно, волна разрежения все время движется по образцу, находящемуся в состоянии, возникшем в нем после прохождения падающей УВ. На рис. 5, б второй профиль отстоит от первого на время, которое требуется ударной волне для прохождения расстояния, равного разнице толщин образцов. Соответственно, $\Delta t = t_2 - t_1$ — это время, которое необходимо волне разрежения для прохождения этого же расстояния. Проведенная таким образом оценка показывает, что лагранжева скорость звука составляет $C_L = 13.9 \pm 0.7$ км/с. Чтобы получить значение эйлеровой скорости $C_E = C_L/\sigma$ надо знать величину сжатия $\sigma = \rho/\rho_0$, здесь ρ и ρ_0 — плотность ударно-сжатого и исходного образца соответственно. В литературе имеются данные, которые ограничивают диапазон значений сжатия при этом давлении.

Как видно на рис. 6, наиболее близко к нашим экспериментальным точкам проходит адиабата энстатита [12]. Для оценки сжимаемости можно использовать значение сжатия, полученное в наших экспериментах: при $u_p = 2.55$ км/с и $u_s = 7.85$ км/с $\sigma = 1.482$, тем более что оно находится между крайними значениями $1.523 \div 1.403$. Тогда $C_E = 9.4 \pm 0.6$ км/с. Это значение близко к скорости звука, измеренной в работе [18] при $p = 63$ ГПа, авторы которой считают, что при этом давлении вещество образца представляет собой еще смесь исходного энстатита и высокобарической фазы — перовскита, скорость звука в котором на 20 % выше. При $p = 64 \div 83$ ГПа исходный энстатит, по их мнению, полностью переходит в перовскит и тогда происходит резкий скачок

скорости звука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фазовый переход в природном пироксените происходит уже при давлении ≈ 60 ГПа за время, которое составляет ≈ 0.2 мкс. Измеренное значение лагранжевой скорости звука 13.9 ± 0.7 , а эйлеровой — 9.4 ± 0.6 км/с, что хорошо согласуется с литературными данными. Проведенные в настоящей работе эксперименты показали, что при высоких давлениях использование лазерной интерферометрии для регистрации массовой скорости в природном пироксените позволяет регистрировать динамику трансформации профилей при протекании фазового перехода в ударно-сжатом веществе. В то же время рентгенографический анализ образцов, сохраненных после ударного нагружения, не обнаружил следов высокобарических фаз, что, по-видимому, связано с обратным переходом к структуре низкого давления при разгрузке либо с необходимостью последующего применения более чувствительных методов анализа вещества. Вопрос о механизме фазового перехода требует дальнейших исследований. Регистрация профилей массовой скорости при давлениях $60 \div 100$ ГПа позволит точнее определить время, необходимое для завершения фазового перехода в пироксените, и установить структуру ударной волны в области резкого изменения скорости звука [18].

Авторы благодарят А. Э. Исоха за любезно предоставленные образцы пироксенита из коллекции полевого материала, а также А. В. Пластинина за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трунин Р. Ф., Гоньшакова В. И., Симков Г. В., Галдин Н. Е. Исследование гор-

- ных пород под действием высоких давлений и температур ударного сжатия // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1965. — № 9. — С. 1–12.
2. **Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Подурец М. А., Моисеев Б. Н., Попов Л. В.** Динамическая сжимаемость кварца и кварцита при высоких давлениях // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1971. — № 1. — С. 13–20.
 3. **Симаков Г. В., Павловский М. Н., Калашников Н. Г., Трунин Р. Ф.** Ударная сжимаемость двенадцати минералов // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1974. — № 8. — С. 11.
 4. **Симаков Г. В., Трунин Р. Ф.** Сжатие минералов ударными волнами // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1980. — № 2. — С. 77.
 5. **Ahrens T. J., Anderson D. L., Ringwood A. E.** Equation of state and crystal structures of high-pressure phases of shocked silicates and oxides // *Rev. Geophys.* — 1969. — V. 7, N 4. — P. 667–707.
 6. **Ahrens T. J., Gafney E. S.** Dynamic compression of enstatite // *J. Geophys. Res.* — 1971. — V. 76. — P. 5504–5513.
 7. **Ahrens T. J., Lower J. H., Lagus P. R.** Equation of state forsterite // *J. Geophys. Res.* — 1971. — V. 76. — P. 518–528.
 8. **Carter N. L., Raleigh C. B., DeCarli P. S.** Deformation of olivine in stony meteorites // *J. Geophys. Res.* — 1968. — V. 73. — P. 5439–5461.
 9. **Jeanloz R.** Shock effects in olivine and implication for Hugoniot data // *J. Geophys. Res.* — 1980. — V. 85. — P. 3163–3176.
 10. **Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р. Ф. Трунина.** — Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
 11. **Compendium of Shock Wave Data / Van Thiel (Ed.)**. — Lawrence Livermore Laboratory, 1977.
 12. **LASL Shock Hugoniot Data / S. P. Marsh (Ed.)**. — Berkeley: Univ. California Press, 1980.
 13. **Tschauner O., Asimow P. D., Ahrens T. J., Kostandova N., Sinogeikin S., Liu Z.** Formation of high-pressure silicate phases in shock experiments // *Lunar and Planetary Sci. XXXIX*. — 2008.
 14. **Tschauner O., Asimow P. D., Kostandova N., Ahrens T. J., Ma C., Sinogeikin S., Liu Z., Fakra S., Tamura N.** Ultrafast growth of wadsleyite in shock-produced melts and its implications for early solar system impact processes // *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 2009. — V. 106, N 33. — P. 13691–13695. — Doi: 10.1073/pnas.0905751106.
 15. **Zizheng Gong, Yingwei Fei, Fu Dai, Li Zhang, Fuqian Jing.** Equation of state and phase stability of mantle perovskite up to 140 GPa shock pressure and its geophysical implications // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — V. 31. — L04614. — Doi: 10.1029/2003GL019132.
 16. **Козлов Е. А., Сазонова Л. В., Фельдман В. И., Дубровинская Н. А., Дубровинский Л. С.** Образование рингвудита при ударно-волновом нагружении плагиоклазово-кварцево-биотитового сланца (экспериментальные данные) // Тр. конф. «VII Забабахинские научные чтения». — Снежинск, 2003.
 17. **Фельдман В. И., Сазонова Л. В., Козлов Е. А.** Высокобарические полиморфные модификации некоторых минералов в импактитах: геологические наблюдения и экспериментальные данные // *Петрология*. — 2007. — Т. 15, № 3. — С. 241–256.
 18. **Zizheng Gong, Lin He, Yingwei Fei, Jinke Yang, Fuqian Jing.** Sound velocity of (Mg_{0.92}, Fe_{0.08}) SiO₃ perovskite up to 140 GPa shock pressure and its geophysical implications // *Shock Compression of Condensed Matter — 2005 / M. D. Furnish, M. Elert, T. P. Russel, C. T. White (Eds.)*. — 2005.
 19. **Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Туркин А. И.** Измерение скорости звука за фронтом ударной волны в смесях железа с алмазом // *Физика горения и взрыва*. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 117–130.
 20. www.valynvisar.com.
 21. **Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Изд-во Янус-К, 1996.
 22. **Савиных А. С., Канель Г. И., Разоренов С. В.** Влияние структурного состояния графита на параметры и кинетику превращения в алмаз при ударном сжатии // *Физика твердого тела*. — 2007. — Т. 49, № 11. — С. 2083–2087.
 23. **Graham R. A.** Solids under high-pressure shock compression (mechanics, physics and chemistry). — New York: Springer-Verlag, 1993.
 24. **Ken-ichi Kondo and Thomas J. Ahrens.** Shock compression of diamond crystal // *Geophys. Res. Lett.* — 1983. — V. 10, N 4. — P. 281–284.
 25. **Уткин А. В., Якушев В. В., Ананьин А. В., Таций В. Ф., Жуков А. Н., Дремин А. Н., Бочко А. В., Кузин Н. Н.** Ударная сжимаемость и откольная прочность кубической модификации поликристаллического нитрида бора // *Теплофизика высоких температур*. — 2009. — Т. 47, № 5. — С. 1–8.

Поступила в редакцию 17/V 2012 г.