

06

Моделирование ударно-волнового нагружения силикатов магния на примере форстерита

© К.К. Маевский^{1,2}

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 15 сентября 2022 г.

Принято к публикации 25 сентября 2022 г.

Представлены результаты моделирования ударно-волнового нагружения форстерита Mg_2SiO_4 , который в данном случае рассматривается как смесь кварца SiO_2 и периклаза MgO . Используемая в расчетах модель основана на предположении, что компоненты исследуемого материала при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии. Рассматривая компоненты, испытывающие полиморфный фазовый переход при высокоэнергетическом воздействии как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, используемая модель позволяет достоверно описывать область фазового перехода. При расчетах для форстерита в диапазоне давлений от 1 до 1000 GPa учитываются полиморфные фазовые переходы кварца и периклаза. Результаты верифицированы по экспериментальным данным, полученным в динамических экспериментах.

Ключевые слова: уравнение состояния, ударная адиабата, термодинамическое равенство, силикаты магния, форстерит.

DOI: 10.21883/0000000000

Введение

Интерес к исследованиям высокоэнергетического воздействия на силикаты магния и, в частности, на форстерит Mg_2SiO_4 связан с тем, что данные материалы доминируют в мантии Земли. Силикаты магния и их фазы высокого давления являются основными составляющими Земли и, возможно, других внутренних планет земной группы. В связи с этим форстерит, по которому имеются экспериментальные данные по высокоэнергетическому воздействию, может использоваться при моделировании планетарных столкновений, которые являются важным процессом формирования и эволюции планет [1]. Детальное понимание как физических, так и химических процессов, происходящих во время и сразу после столкновения космических тел, мотивирует точное описание форстерита при давлениях и температурах, значительно превосходящих те, которые соответствуют недрам Земли [2]. Кроме того, открытие новых экзопланет вокруг других звезд в нашей галактике поднимает новые вопросы о разнообразии планетарной архитектуры и о том, как такие планеты могут формироваться и развиваться [3–5]. Растет интерес к экспериментальным исследованиям геологических материалов в условиях сверхвысокого давления и температуры для решения как новых, так и давних вопросов науки о Земле и планетах [6,7]. Знание состава и минералогии планет помогает определять их эволюцию и внутреннюю структуру [8]. Параметры форстерита при ударно-волновом нагруже-

ние были экспериментально исследованы в диапазоне от 200 до 950 GPa и дополнены теоретическими расчетами [2]. Исследования энстатита $Mg_2[Si_2O_6]$ и форстерита с использованием ударного волнового сжатия обобщены в [9,10].

Высокоэнергетическое воздействие приводит к фазовым превращениям многих материалов. Экспериментальные исследования фазовых диаграмм при высоких давлениях, фазовых переходов в системах оксид магния — кварц $MgO-SiO_2$ выполнены в [11]. В [12] отмечается, что форстерит имеет несколько фазовых переходов при значениях давления ниже 200 GPa. Авторы [13] получили ударные адиабаты, на которых отмечались несколько изменений наклона в диапазоне давлений между 270 и 470 GPa, которые интерпретировались как соответствующие области фазовых превращений. Напротив, в [11] не наблюдали признаков фазового перехода выше 200 GPa вдоль ударной адиабаты, что прямо противоречит результатам [13]. Данные о волновой и массовой скоростях в этих экспериментах показывают линейный рост и отсутствие признаков каких-либо фазовых превращений. При таких результатах необходимо дальнейшее изучение ударной адиабаты форстерита, чтобы лучше понять свойства этого материала и построить его уравнение состояния в областях значений давления и температуры, которые важны для моделирования внутренних планет и процессов планетарных столкновений [2]. Также в [12] показано, что при давлениях, соответствующих нижней мантии Земли, ста-

бильного соединения с составом Mg_2SiO_4 не существует. Следовательно, достижение равновесного состояния из изначально однородного кристалла форстерита требует разложения, по меньшей мере, на два соединения.

Фазовая диаграмма при ударном сжатии до 200 GPa Mg_2SiO_4 была исследована [9]. Отмечается, что ключевой вопрос касается диссоциации Mg_2SiO_4 вдоль ударной адиабаты, и что именно по этой причине было бы важно подтвердить наличие MgO или $MgSiO_3$ в ударно-волновых исследованиях Mg_2SiO_4 . Ранее в [14] было отмечено, что наблюдалась диссоциация Mg_2SiO_4 в окислы MgO и SiO_2 (стишовит). Данные эксперименты проводились при значении давления 33 GPa, что соответствует давлению в мантии Земли на глубине 1000 km. Этот же вопрос обсуждается в работах [11,15], где отмечается, что описание поведения, в частности для $MgSiO_3$ и Mg_2SiO_4 , все еще далеко от удовлетворительного, особенно, при высоких давлениях выше 2 Mbar. В [16] предположили, что режим смешанной фазы существует для монокристаллического форстерита, подвергнутого воздействию давлений от 50 до 120 GPa, и что этот режим существует в меньшем диапазоне давлений для поликристаллического форстерита. Предполагается, что превращение в смесь высокого давления MgO + $MgSiO_3$ перовскита завершено на 100 GPa для исходного материала форстерита [9]. В работе [17] при нормальной температуре наблюдалась структура форстерита при сжатии до 48 GPa. При 50 GPa происходит фазовый переход к новой структуре (форстерит II), и далее переход к форстериту III при 58 GPa. При этом наблюдается суммарное уменьшение объема $\sim 10\%$. Дискуссия о возникновении фазовых переходов вдоль ударных адиабат в настоящее время продолжается. Следует отметить, что экспериментальное исследование влияния давления на кинетику фазовых превращений является еще более сложной задачей, чем исследование фазовых равновесий под давлением. Этим объясняется очень малое количество исследований в этом направлении [18].

1. Постановка задачи

Исходя из наличия данных о диссоциации силикатов магния на компоненты, было высказано предположение, что данными компонентами являются MgO и SiO_2 . Исследованиям этих оксидов в связи изучением состава мантии Земли посвящено много работ, в частности [19]. В этом случае фазовые переходы силикатов можно рассматривать как фазовые переходы компонентов, на которые они распадаются при соответствующих давлениях. Для моделирования необходима модель ударно-волнового нагружения материалов с компонентами, испытывающими фазовый переход при высоких динамических нагрузках. Достоверное описание для материалов, испытывающих фазовый переход, получено по термодинамически равновесной модели [20]. По данной модели выполнены расчеты ударно-волнового нагруже-

ния форстерита, рассматриваемого как смесь кварца SiO_2 и периклаза MgO в соотношении 1 : 2, исходя из стехиометрического соотношения. Предполагается, что компоненты исследуемого материала при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии (равенство скоростей, давлений и температур). Для двухфазной среды это предположение ранее применялось, в частности, в [21]. Рассматриваемая модель позволяет достоверно описывать результаты ударно-волновых экспериментов в диапазоне значений давления от 1 GPa до 10 TPa как для сплошных, так и для пористых образцов чистых материалов, в том числе для SiO_2 и MgO. Дополняя систему уравнений динамической совместности условием равенства температур компонентов смеси, выписываются зависимости, которые можно трактовать как ударные адиабаты гетерогенного образца [22–24]. При этом, рассматривая исследуемый материал в области фазового перехода как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, можно достоверно описывать и область полиморфного фазового перехода для различных веществ, включая оксиды [25,26].

2. Методика расчета

Для моделирования поведения конденсированных фаз используются уравнения состояния типа Мингрюнайтзена:

$$P(\rho, T) = P_C(\rho) + P_T(T), \quad P_T(\rho, T) = \Gamma\rho E_T(T), \quad (1)$$

где

$$E_T(T) = c_V(T - T_0), \quad (2)$$

P_C , — потенциальная компонента давления, P_T , — тепловая компонента, E_T — тепловая компонента давления удельной энергии, c_V — теплоемкость, T_0 — температура при начальных условиях. Для газа берется уравнение состояния идеального газа. Выписываются условия динамической совместности на фронте волны в виде соотношений Рэнкина–Гюгонио, которые выражают условия сохранения массы, импульса и энергии [27]:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{D}{D - U}, \quad P = \rho_0 U D, \quad E = \frac{1}{2} P \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right), \quad (3)$$

где ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотности конденсированного компонента, U , D — массовая и волновая скорости. С учетом области применения данной модели для значений давления более 1 GPa значения энергии и давления при нормальных условиях не учитываются. Условия сохранения потоков импульса и энергии задаются для смеси в целом. При этом для потока массы условия сохранения выписываются для каждого компонента отдельно. Этот подход позволяет рассчитывать не только сжатие материала в целом, но и определять значение сжатия каждого компонента в отдельности. Для материала, в состав которого входят n твердых компонентов с начальными объемными долями μ_{n0} , получены

следующие выражения:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} \left[\left(h_i - \frac{k_i+1}{k_i-1} \right) \sigma_i^{k_i} + \frac{2k_i \sigma_i}{k_i-1} - h_i - 1 \right]}{\sum_{i=1}^n \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} h_i + \left(\frac{h_g}{\sigma_g} \right) \left(1 - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} \right) - 1}, \quad (4)$$

$$h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1, \quad h_g = \frac{2}{\gamma - 1} + 1.$$

Здесь $\sigma_i = \rho_i/\rho_{i0}$, $\sigma_g = \rho_g/\rho_{g0}$ — степени сжатия соответствующего компонента $i = 1 \dots n$, а ρ_g, ρ_{g0} — текущая и начальная плотности газа с показателем адиабаты, $\gamma = 1.41$. Функция $\Gamma = P_T V/E_T$ определяет вклад тепловых компонент, при этом в явном виде зависит только от температуры [28]. Дополняя (4) условием равенства значений температур компонентов и уравнениями состояния каждого компонента, находятся зависимости, которые можно рассматривать как ударные адиабаты гетерогенного материала $P(U)$ или $D(U)$ (A, k — коэффициенты в уравнениях состояния).

Термодинамические параметры гетерогенных материалов (значения давления, плотности, температуры) рассчитаны в области полиморфного фазового перехода, исходя из предположения, что исследуемый материал является смесью фазы низкого давления и фазы высокого давления [24–26]. При моделировании в области фазового перехода предполагается, что объемная доля α -фазы низкого давления перешла в фазу высокого давления. По данным экспериментов определяется значение давления, соответствующее началу процесса фазового перехода. Значение доли α близко к линейной в зависимости от приращения внутренней энергии: $\alpha = \Delta E/kf$, при этом $kf = E_f - E_b$, $\Delta E = E - E_b$ (E — текущая внутренняя энергия, E_b — внутренняя энергия в начале фазового перехода, E_f — внутренняя энергия в конце фазового перехода, когда весь материал перешел в фазу высокого давления). Параметр kf позволяет описать данные экспериментов для исследуемых образцов, имеющих различные значения пористости. При расчетах ударной адиабаты задаются три участка моделирования для материалов, испытывающих полиморфный фазовый переход [24]:

$$\begin{cases} E \leq E_b, & \alpha = 0, \\ E_g \leq E \leq E_f, & \alpha = \Delta E/kf, \\ E \leq E_f, & \alpha = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Для SiO_2 и MgO определены следующие значения: параметр kf равен 2.5 и 15.0 kJ/g, давление начала фазового перехода 11 и 250 GPa соответственно.

3. Результаты моделирования

Результаты моделирования термодинамических параметров и данные, полученные на основании экспериментов, приведены на рис. 1 для аморфного кварца с плотностью $\rho_0 = 2.204 \text{ g/cm}^3$ с учетом фазового перехода в

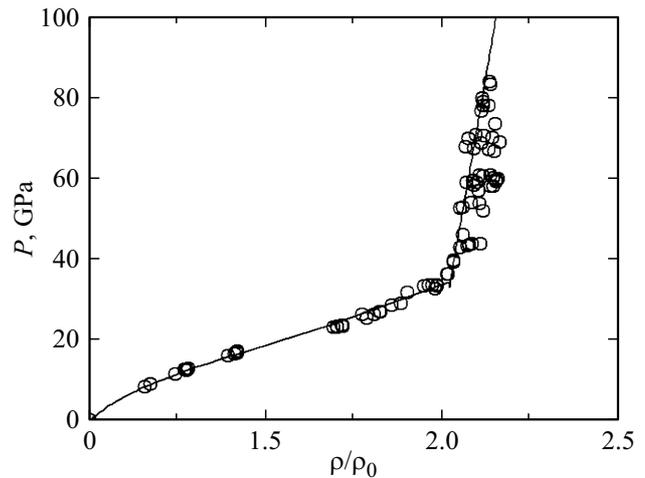


Рис. 1. Ударная адиабата кварца. Данные [29,30].

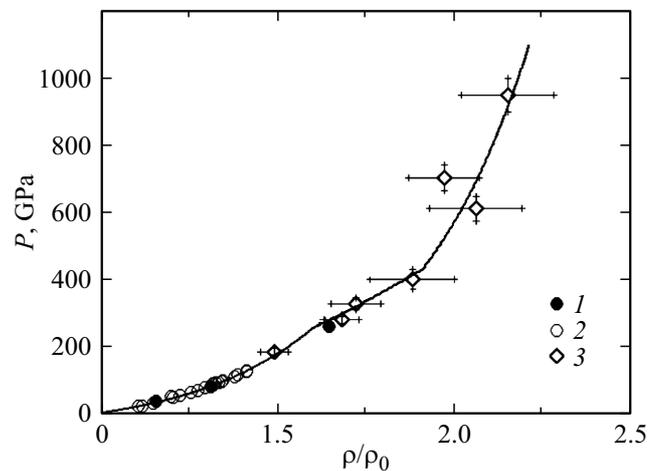


Рис. 2. Ударная адиабата для MgO . Расчет — сплошная линия. Данные 1 — [31], 2 — [32] и 3 — [33].

координатах давление—сжатие. До начала фазового перехода при значении давления 11 GPa расчет совпадает с ударной адиабатой кварца (фаза низкого давления). При давлении выше 40 GPa предполагаем, что фазовый переход закончен, расчет соответствует ударной адиабате стишовита, рассматриваемого как фазу высокого давления кварца той же начальной плотности, что и исходный образец. В этом случае значение пористости m (отношение плотности монолитного образца к плотности пористого) для стишовита будет 1.63.

Для MgO результаты моделирования и данные, полученные в экспериментах, показаны на рис. 2 в переменных давление—сжатие. Параметры модели, которые использовались в расчетах для оксидов SiO_2 и MgO , отражены в таблице для фазы низкого (1) и фазы высокого давления (2) соответственно.

Возможность описывать поведение чистых материалов позволила рассчитать в том числе и поведение смесей, в состав которых в частности вхо-

Параметры SiO₂ и MgO для фаз низкого давления — 1 и фаз высокого давления — 2

Параметр	MgO (1)	MgO (2)	SiO ₂ (1)	SiO ₂ (2)
A, GPa	39.62	40.0	14.5	130
ρ , g/cm ³	3.584	4.050	2.204	4.310
n	4	3.99	4.05	3.00
c_v , J/(kg·K)	937.2	937.2	1100	1100
$\Gamma(T_0)$	1.05	1.07	1.3	1.3
$\Gamma(T^*)$	0.90	1.06	0.80	0.09
T, K·10 ³	23	23	20	20
$\Gamma(T_\infty)$	0.500	0.500	0.500	0.500

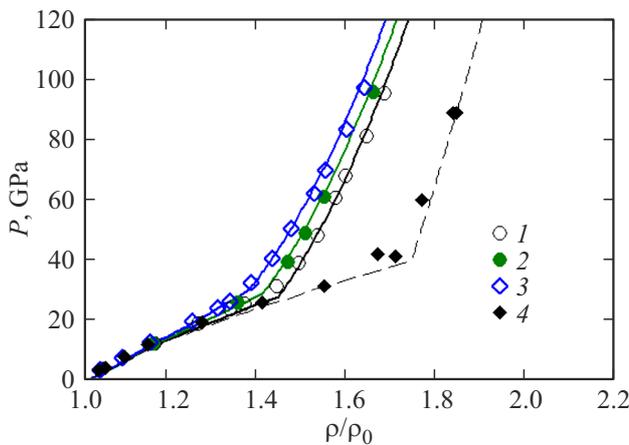


Рис. 3. Ударные адиабаты смесей алюминия с кварцем и кварца. Сплошные кривые ударные адиабаты смесей, штриховая линия адиабата кварца. Эксперимент: смеси Al и SiO₂ имеющие соотношение молярных долей: 1 — 50 : 50, 2 — 40 : 60, 3 — 30 : 70 [34]; 4 — кварц [35].

дит кварц. На рис. 3 показан расчет в переменных давление—сжатие смеси алюминия и кварца при соотношении объемных долей 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, а также для сравнения приведена ударная адиабата для чистого кварца, используя данные экспериментов из [30,34,35]. Как отмечали авторы [34], аддитивная модель при описании такой смеси не позволила восстановить ударную адиабату кварца. Это связано с тем, что правило аддитивности при таком подходе является приближенным, поскольку предполагает несуществующее в реальности соответствие сжатия компонентов, находящихся в гетерогенных смесях, с ударным сжатием гомогенных компонентов [36,37]. Достоверное описание результатов по ударно-волновому нагружению кварца с другими материалами приведено в [38]. Моделировались смеси кварца с парафином, вольфрамом различных составов, а также с тефлоном и эпоксидной смолой в диапазоне сжатий до 80 GPa.

Используя данный метод расчета гетерогенных материалов, достоверно описаны экспериментальные результаты ударно-волнового нагружения различных нитридов, испытывающих фазовый переход при динамиче-

ских нагрузках [25], а также их смесей. Была показана возможность моделировать параметры смеси с двумя компонентами, испытывающими фазовый переход при ударно-волновом нагружении.

С учетом наблюдавшейся диссоциации Mg₂SiO₄ в окислы MgO и SiO₂ в форме стишовита [14] при значении давлениях 33 GPa можно предположить, что и для форстерита при этом значении давления так же будет присутствовать стишовит. Модельный расчет показал, что при этом значении давления большая часть SiO₂ действительно перешла в фазу высокого давления, т.е. стишовит.

Исходя из предположения о возможной диссоциации силикатов магния под давлением, выполнены расчеты для форстерита как смеси оксидов SiO₂ и MgO. Результаты моделирования для форстерита $\rho_0 = 3.273 \text{ g/cm}^3$ показаны на рис. 4 в переменных давление—массовая скорость, значение пористости $m = 1.03, 1.08$ определялось по среднему значению исследованных образцов. Здесь же показаны данные двух групп экспериментов для образцов со средней плотностью 3.01 и 2.95 g/cm³. Отклонение, в частности, объясняется разбросом значений плотности. Получено описание поведения пористых образцов в пределах точности эксперимента.

Результаты моделирования для форстерита в диапазоне значений давления до 1 TPa и данные [13] показаны на рис. 5, 6 с учетом фазовых переходов SiO₂ и MgO. Для MgO область фазового перехода определена в диапазоне 250—400 GPa.

Представляет интерес сравнить результаты моделирования для смесей, имеющих тот же состав, что предположительно возникает при диссоциации форстерита на два оксида. Модельные расчеты для пористых смесей периклаза и кварца в молярном соотношении MgO(67)SiO₂(33), имеющие значения плотности $\rho_0 = 1.894$ и 1.693 g/cm^3 , показаны на рис. 7, 8; значение пористости для них $m = 1.675$ и 1.84 соответственно.

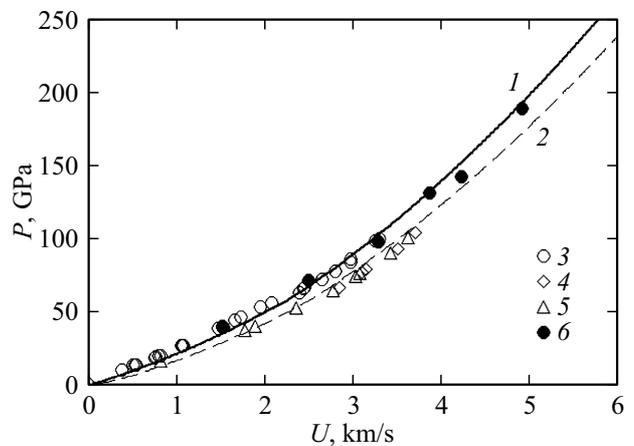


Рис. 4. Ударная адиабата форстерита $\rho_0 = 3.273 \text{ g/cm}^3$. Расчет — кривая 1 — $m = 1.03$, 2 — $m = 1.08$; данные 3, 5 — [29], 4 — [32], 6 — [39].

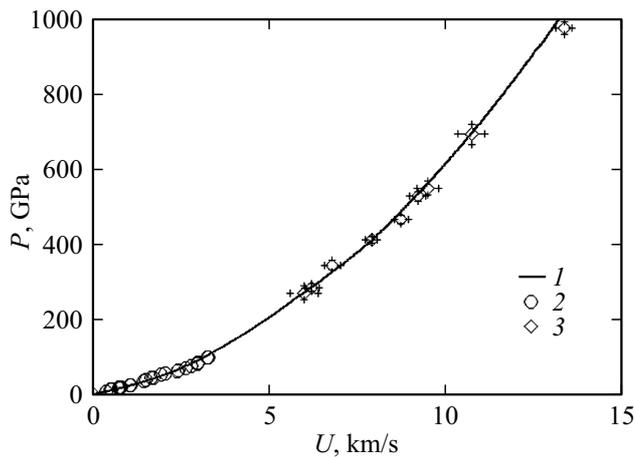


Рис. 5. Ударная адиабата форстерита в переменных давление–массовая скорость $\rho_0 = 3.273 \text{ g/cm}^3$. Расчет — кривая 1; данные 2 — [29], 3 — [13].

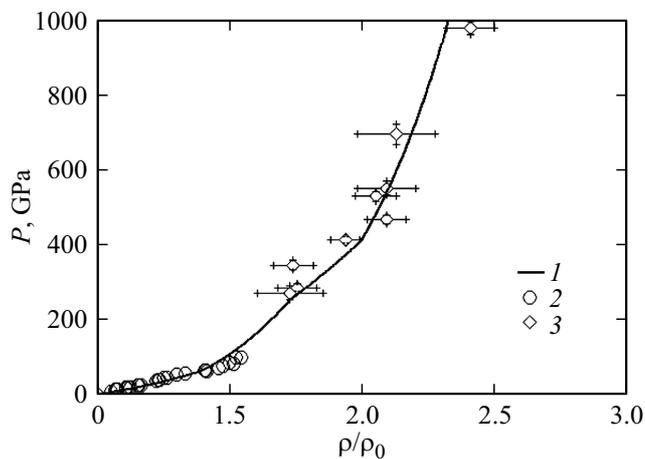


Рис. 6. Ударная адиабата форстерита в переменных давление–сжатие $\rho_0 = 3.273 \text{ g/cm}^3$. Расчет — кривая 1; данные 2 — [29], 3 — [13].

Здесь же приведены данные, полученные на основании экспериментов [28].

Получено достоверное описание имеющихся экспериментальных данных, при этом параметры, определенные для оксидов, использовались для описания смесей с этими оксидами, а так же для форстерита, рассматривая его как смесь оксидов на уровне точности экспериментов.

4. Обсуждение результатов

Результаты проведенного моделирования показывают, что расчеты по термодинамически равновесной модели, основанные на предположении о диссоциации форстерита Mg_2SiO_4 на SiO_2 и MgO , в соответствии со стехиометрическим соотношением достоверно описывают имеющиеся данные, полученные на основании экспериментов. Рассматривая компоненты исследуемого материала в

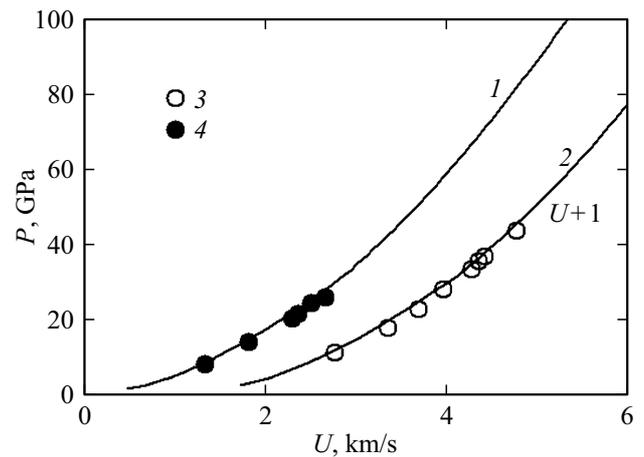


Рис. 7. Ударная адиабата смеси периклаза и кварца в переменных давление–массовая скорость. 1 — $\rho_0 = 1.894 \text{ g/cm}^3$, 2 — $\rho_0 = 1.693 \text{ g/cm}^3$. ($m 1.675; 1.84$) [29,30].

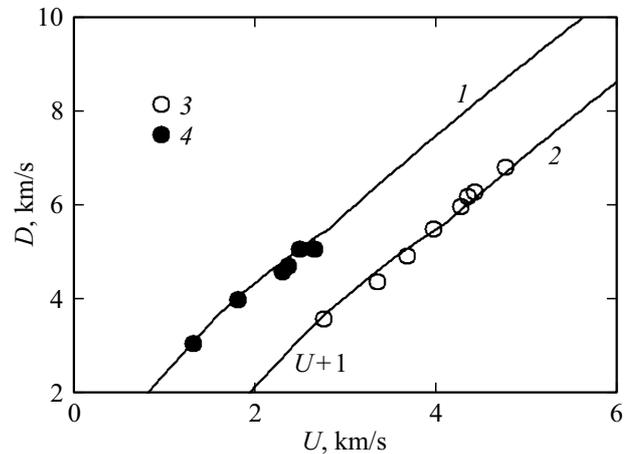


Рис. 8. Ударная адиабата смеси периклаза и кварца в переменных волновая–массовая скорости. Обозначения как на рис. 7.

области фазового перехода как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, используемая модель позволяет достоверно описывать несколько фазовых переходов. В данном случае появляется возможность учесть и фазовый переход высокого давления для MgO .

С учетом достоверного описания экспериментальных данных по форстериту до 1000 GPa, которое превышает значение давления в центре Земли в три раза [40], можно предположить, что данный подход будет полезен при расчетах для более массивных планет. Этот подход может быть использован и для других силикатов магния. Совместные результаты по различным силикатам позволят прогнозировать профили давления и температур, в зависимости от их состава, а также позволит оценить вклад фазовых переходов материалов в изменение плотности мантии Земли.

Хорошее соответствие модельных расчетов результатам, полученным для форстерита на основании экспериментов, позволяет предположить, что используемая

методика позволит достоверно описывать поведение других аналогичных материалов, содержащих компоненты, испытывающих фазовый переход при динамическом воздействии.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Бюджетного проекта III.22.3.1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.J. Davies, M.S. Duncan, S. Root, R.G. Kraus, D.K. Spaulding, S.B. Jacobsen, S.T. Stewart. *JGR Planets*, **126**, e2020JE006745 (2021). DOI: 10.1029/2020JE006745
- [2] S. Root, J.P. Townsend, E. Davies, R.W. Lemke, D.E. Bliss, D.E. Fratanduono, R.G. Kraus, M. Millot, D.K. Spaulding, L. Shulenburg, S.T. Stewart, S.B. Jacobsen. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3865 (2018). DOI: 10.1029/2017GL076931
- [3] T.S. Duffy, R.F. Smith. *Front. Earth Sci.*, **7**, 23 (2019). DOI: 10.3389/feart.2019.00023
- [4] H. Niu, A.R. Oganov, A., X.Q. Chen, D. Li. *Sci. Rep.*, **5**, 18347 (2016). DOI: 10.1038/srep18347
- [5] K. Umemoto, R.M. Wentzcovitch, S. Wu, M. Ji, C.Z. Wang, K.M. Ho. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **478**, 40 (2017). DOI: 10.1016/j.epsl.2017.08.032
- [6] W.J. Borucki. *Rep. Prog. Phys.*, **79**, 036901 (2016). DOI: 10.1088/0034-4885/79/3/036901
- [7] P.E. Driscoll. *Planetary Interiors, Magnetic Fields, and Habitability*. In: *Handbook of Exoplanets*. Ed. by H. Deeg, J. Belmonte (Springer, Cham., 2018), DOI: 10.1007/978-3-319-55333-7_76
- [8] C.T. Unterborn, J.E. Kabbes, J.S. Pigott, D.M. Reaman, W.R. Panero. *Astrophys. J.*, **793**, 2 (2014). DOI: 10.1088/0004-637X/793/2/124
- [9] J.L. Mosenfelder, P.D. Asimow, T.J.J. Geophys. Res., **112**, B06208 (2007). DOI: 10.1029/2006JB004364
- [10] J.L. Mosenfelder, P.D. Asimow, D.J. Frost, D.C. Rubie, T.J. Ahrens. *J. Geophys. Res.*, **114**, B01203 (2009). DOI: 10.1029/2008JB005900
- [11] R.M. Bolis, G. Morard, T. Vinci, A. Ravasio, E. Bambrink, M. Guarguaglini, M. Koenig, R. Musella, F. Remus, J. Bouchet, N. Ozaki, K. Miyanishi, T. Sekine, Y. Sakawa, T. Sano, R. Kodama, F. Guyot, A. Benuzzi-Mounaix. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 9475 (2016). DOI: 10.1002/2016GL070466
- [12] M.G. Newman, R.G. Kraus, M.C. Akin, J.V. Bernier, A.M. Dillman, M.A. Homel, S. Lee, J. Lind, J.L. Mosenfelder, D.C. Pagan, N.W. Sinclair, P.D. Asimow. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 8129 (2018). DOI: 10.1029/2018GL077996
- [13] T. Sekine, N. Ozaki, K. Miyanishi, Y. Asaumi, T. Kimura, B. Albertazzi, Y. Sato, Y. Sakawa, T. Sano, S. Sugita, T. Matsui, R. Kodama. *Sci. Adv.*, **2**, e1600157 (2016). DOI: 10.1126/sciadv.1600157
- [14] M. Kumazawa, H. Sawamoto, E. Ohtani, K. Mazaki. *Nature*, **247**, 356 (1974).
- [15] D.K. Spaulding, R.S. McWilliams, R. Jeanloz, J.H. Eggert, P.M. Celliers, D.G. Hicks, G.W. Collins, R.F. Smith. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 065701 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.065701
- [16] Y. Syono, T. Goto, J. Sato, H. Takei. *J. Geophys. Res.*, **86**, 6181 (1981). DOI: 10.1029/JB086iB07p06181
- [17] G.J. Finkelstein, P.K. Dera, S. Jahn, A.R. Oganov, C.M. Holl, Y. Meng, T.S. Duffy. *Am. Mineral.*, **99** (1), 35 (2014). DOI: 10.2138/am.2014.4526
- [18] X.G. Huang, X.H. Yuan, Z.A. Chen, F.S. Liu, W.M. Bai. *Sci. China Earth. Sci.*, **592016**, 619 (2016). DOI: 10.1007/s11430-015-5231-2
- [19] Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков. *Изв. АН СССР. Сер. Физика земли*, **29** (10), 1 (1965).
- [20] К.К. Маевский, С.А. Кинеловский. *ЖТФ*, **89**, 1158 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47885.423-18 [К.К. Maevskii, S.A. Kinelovskii. *Tech. Phys.*, **64**, 1090 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219080127]
- [21] В.В. Милявский, В.Е. Фортов, А.А. Фролова, К.В. Хищенко, А.А. Чарахчян, Л.В. Шуршалов. *ЖВМиМФ*, **46** (5), 913 (2006). [V.V. Milyavskii, V.E. Fortov, A.A. Frolova, K.V. Khishchenko, A.A. Charakhch'yan, L.V. Shurshalov. *Comput. Math. Math. Phys.*, **46**, 873 (2006). DOI: 10.1134/S0965542506050113]
- [22] К.К. Маевский К.К. *AIP Conf. Proc.*, **2051**, 020181 (2018). DOI: 10.1063/1.5083424
- [23] К.К. Маевский. *ЖТФ*, **91** (5), 815 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50694.293-20 [К.К. Maevskii. *Tech. Phys.*, **66** (5), 791 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221050145]
- [24] Маевский К. *AIP Conf. Proc.*, 2103, 020009 (2019). 10.1063/1.5099873
- [25] К.К. Маевский, С.А. Кинеловский. *ТВТ*, **56** (6), 876 (2018). DOI: 10.31857/S004036440003564-4 [К.К. Maevskii, S.A. Kinelovskii. *High Temperature*, **56** (6) 853 (2018). DOI: 10.1134/S0018151X18060172]
- [26] К.К. Маевский. *J. Phys. Conf. Series.*, **894**, 012057 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012057
- [27] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Физматлит, М., 2008), с. 519.
- [28] К.К. Маевский. *ЖТФ*, **92** (1), 100 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51858.200-21
- [29] S.P. Marsh (ed.) *LASL Shock Hugoniot Data* (Univ. California Press., Berkeley, 1980)
- [30] P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, I.V. Lomonosov, V.E. Fortov. *AIP Conf. Proc.*, **706**, 87 (2004). <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>
- [31] Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков. *Изв. АН СССР. Сер. Физика земли*, **29** (10), 1 (1965).
- [32] *Compendium of shock wave data*, ed. by M. Thiel (Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-50108, 1977), p. 401.
- [33] K. Miyanishi, Y. Tange, N. Ozaki, T. Kimura, T. Sano, Y. Sakawa, T. Tsuchiya, R. Kodama. *Phys. Rev. E*, **92**, 023103 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.92.023103
- [34] М.А. Подурец, Г.В. Симаков, Р.Ф. Трунин. *Изв. АН СССР*, **4**, 28 (1968).
- [35] Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков, М.А. Подурец. *Изв. АН СССР*, **2**, 33 (1971).

- [36] Р.Ф. Трунин. *Исследования экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнения Гюгонио* (РФЯФ–ВНИИЭФ, Саров, 2006), с. 137.
- [37] А.А. Баканова, И.П. Дудоладов, Ю.Н. Сутулов. Прикладная механика и тех. физика, **6**, 167 (1972).
- [38] К.К. Maevskii, S.A. Kinelovskii. AIP Conf. Proc., **1683**, 020132 (2015). 10.1063/1.4932822
- [39] J.L. Mosenfelder, P.D. Asimow, T.J. Ahrens. J. Geophys. Res., **112**, B06208 (2007). DOI: 10.1029/2006JB004364
- [40] A.M. Dziewonski, D.L. Anderson. Phys. Earth Planet. Inter., **25**, 297 (1981). DOI:10.1016/0031-9201(81)90046-7