

11,12

## Численное моделирование поведения энстатита до 1.4 ТПа

© К.К. Маевский

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

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

Поступила в Редакцию 17 марта 2023 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2023 г.

Принята к публикации 23 апреля 2023 г.

Для понимания строения и состава мантии Земли и подобных планет требуется точное описание влияния экстремальных давления и температуры на физические свойства составляющих материалов. Одним из таких материалов является энстатит  $\text{MgSiO}_3$ , что вызывает повышенный интерес к исследованиям данного материала при интенсивных динамических нагрузках. На основании данных полученных на основании экспериментов, в которых наблюдалось разложение силикатов магния, предлагается рассмотреть ударно-волновое нагружение энстатита как смеси оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  в равном стехиометрическом соотношении. Расчеты выполняются по термодинамически равновесной модели, учитывающей фазовые переходы компонентов. При моделировании высокоэнергетического воздействия на энстатит учитываются фазовые переходы  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$ . Результаты сравниваются с данным, полученным на основании экспериментов по ударно-волновому нагружению, а также с расчетам по модели PREM выполненным по результатам сейсморазведки.

**Ключевые слова:** уравнение состояния, фазовые переходы, силикаты магния, оксид кварца, оксид магния.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55668.38

### 1. Введение

Для решения фундаментальных вопросов о структуре, динамике и эволюции мантии Земли и новых экзопланет проводятся многочисленные эксперименты по исследованию геологических материалов при высоких значениях давления и температуры, соответствующих тем, что предполагаются в недрах планет [1,2]. В частности, исследования фазовых равновесий определили различные фазы силикатов и оксидов при высоком давлении [3,4]. При этом расчеты для энстатита  $\text{MgSiO}_3$ , основанные на первых принципах, показывают, что этот минерал должен диссоциировать на  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$  при давлениях и температурах, которые, как ожидается, будут наблюдаться на экзопланетах земной группы [5]. Ранее в экспериментах [6] в районе значения давления 33 ГПа уже наблюдалась такая диссоциация для  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  в  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$  в виде стишовита, ввиду того, что  $\text{SiO}_2$  переходит в стишовит при значениях давления выше 10 ГПа [7]. В [8] исследовались модельные составы материалов мантии с шестью компонентами:  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ . При этом отмечалось, что основную долю в состав материалов мантии вносят, как правило,  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$ . Понимание воздействий экстремальных давлений и температур требует точного описания их влияния на физические свойства составляющих материалов, что вызывает необходимость в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях. В [9] исследовались фазовые соотношения и другие расчетные данные при давлениях до 12 ГПа и температурах до 2000 К для  $\text{MgSiO}_3$ . В [10] приведены данные об ударных экспериментах

с  $\text{MgSiO}_3$  до значений давления 1400 ГПа и плотности образцов при этом более  $9 \text{ g/cm}^3$ . Эксперименты по исследованию фазовых диаграмм при высоких давлениях и фазовых переходов в системах  $\text{MgO-SiO}_2$  приведены в [11]. В работе [12] приводятся экспериментальные данные по сжатию кристаллов  $\text{MgSiO}_3$  до значений давления 400 ГПа, а уравнения состояния построены до 950 ГПа. Уравнения состояния  $\text{MgSiO}_3$  и фазовая диаграмма  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  при давлениях до 130 ГПа были построены в [13].

Большое внимание уделяется возможности фазового перехода исследуемых силикатов магния [13]. Так, в работе [14] причину повышенного интереса к этим материалам связывают с тем, что такие материалы как  $\text{MgO}$ ,  $\text{MgSiO}_3$  и  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  являются одними из наиболее важных конечных элементов мантии Земли и аналогичных планет. В связи с этим подробное знание фазовой диаграммы этих магниевых конечных элементов имеет большое значение для правильного моделирования внутренних структур планет. Это приводит к необходимости изучать фазовые диаграммы в более широком диапазоне давлений и температур, используя, в частности, методы динамического сжатия. В последнее время были проведены различные теоретические и экспериментальные исследования динамически сжатых фаз силикатов магния, но некоторые противоречия еще не решены [14]. В работе [15] с использованием моделирования молекулярной динамики *ab initio* рассчитаны физические свойства  $\text{MgO}$  в условиях, простирающихся от тех, которые встречаются в мантии Земли, до ожидаемых для гигантских планет, таких как Юпитер.

## 2. Постановка задачи

Проверка представления, что состав мантии Земли определяется продуктами разложения ферромагнезильных силикатов на окислы MgO, SiO<sub>2</sub> и немного FeO проведена в [16] на основании информации, полученной в экспериментах по сжатию ударными волнами периклаза и SiO<sub>2</sub> до давлений 250 GPa. Предполагается, что аномальное возрастание плотности можно отнести за счет фазовых превращений силикатов. На основании этих предположений и с учетом экспериментальных данных о диссоциации силикатов магния на окислы MgO и SiO<sub>2</sub> [6], которые получены при значении давлений в районе фазового перехода SiO<sub>2</sub>, было высказано предположение, что фазовые переходы силикатов магния определяются фазовыми переходами компонентов, на которые исходные материалы распадутся при соответствующих давлениях. Для проверки данного описания таких процессов необходима модель, позволяющая рассчитывать поведение смесей с компонентами, испытывающими фазовый переход при высоких динамических нагрузках. Наиболее распространенным является аддитивное приближение, при котором объем ударно сжатой смеси предполагается равным сумме объемов компонентов, полученных при том же давлении при их раздельном ударном сжатии. Для сплошных образцов получены удовлетворительные данные [17]. Однако правило аддитивности при таком подходе является приближенным, поскольку предполагает не существующую в действительности тождественность процессов сжатия компонентов, находящихся в гетерогенных смесях, с ударным сжатием компонентов. Также возникают сложности при наличии фазовых переходов в образцах. Попытка, в частности, восстановить ударную адиабату SiO<sub>2</sub> [18] по ударной адиабате смеси алюминия с SiO<sub>2</sub> и ударной адиабате чистого алюминия, используя аддитивную модель, не увенчалась успехом. Причина в том, что экспериментальные данные фазы высокого давления, в котором вещество находится после фазового перехода, соответствуют ударной адиабате фазы высокого давления с плотностью исходного образца. С учетом того, что плотность фазы высокого давления выше плотности фазы низкого давления, фактически необходим расчет ударной адиабаты пористого вещества, что требует соответствующего уравнения состояния.

Для материалов, испытывающих фазовый переход, используется термодинамически равновесная модель [19]. Расчеты ударно-волнового нагружения Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, который рассматривается как смесь оксидов SiO<sub>2</sub> и MgO, приведены в [20,21]. Модель основана на предположении, что компоненты смеси в условиях ударно-волнового нагружения находятся в термодинамическом равновесии, то есть учитывается, в том числе, и равенство температур компонентов. Для двухфазной среды это предположение применялось в работе [22]. Авторская

модель достоверно описывает высокоинтенсивное воздействие на материалы в широком диапазоне значений давления, в том числе для оксидов SiO<sub>2</sub> и MgO [23,24]. Учет равенства температур компонентов смеси позволяет рассчитывать ударные адиабаты смесей в пределах точности экспериментов [25,26]. В области фазового перехода образец рассматривается как смесь фазы низкого и фазы высокого давления, что дает возможность достоверно описывать область полиморфного фазового перехода исследуемых веществ [27]. Появляется возможность описывать термодинамические параметры смесей содержащих в своем составе компоненты, испытывающие фазовый переход при ударно-волновом воздействии.

## 3. Модель расчета

Для описания поведения конденсированных фаз используются уравнение состояния типа Ми–Грюнайзена в следующем виде:

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

$$P_T(\rho, T) = \Gamma \rho E_T(T), \quad E_T(T) = c_V(T - T_0). \quad (2)$$

Здесь  $P_C$  — потенциальная компонента давления;  $P_T$ ,  $E_T$  — тепловые компоненты давления и удельной;  $c_V$  — теплоемкость;  $T_0$  — начальная температура. Холодная составляющая давления  $P_C$  описывается следующим уравнением:  $P_C(\rho/\rho_0) = A((\rho/\rho_0)^k - 1)$ , ( $\rho$ ,  $\rho_0$  — текущая и начальная плотность конденсированного компонента,  $A$ ,  $k$  — коэффициенты уравнения состояния). Для газа, в случае пористых материалов, используется уравнение состояния идеального газа. Выписываются условия сохранения потока массы для каждого компонента смеси и условия сохранения потоков импульса и энергии для смеси в целом. Для материала, в состав которого входят  $n$  твердых компонентов, имеющих начальные объемные доли  $\mu_{i0}$ , можно получить следующую зависимость давления от сжатия компонентов:

$$P = \left( \sum_{i=1}^n A_i \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} \left[ \left( h_i - \frac{k_i + 1}{k_i - 1} \right) \sigma_i^{k_i} + \frac{2k_i \sigma_i}{k_i - 1} - h_i - 1 \right] \right) / P_1,$$

$$P_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_{i0}}{\sigma_i} h_i + \left( \frac{h_g}{\sigma_g} \right) \left( 1 - \sum_{i=1}^n \mu_{i0} \right) - 1. \quad (3)$$

При этом  $h_i = 2/\Gamma_i + 1$ ;  $h_g = 2/(\gamma - 1) + 1$ .  $\sigma_i = \rho_i/\rho_{i0}$  — степени сжатия конденсированного компонента  $i = 1, \dots, n$ ,  $\sigma_g = \rho_g/\rho_{g0}$ , а  $\rho_g$ ,  $\rho_{g0}$  — текущая и начальная плотности газа, показатель адиабаты  $\gamma = 1.41$ . Для описания высокоэнергетического воздействия на материалы различной пористости в уравнении состояния вводится функция  $\Gamma = P_T V / E_T$ , определяющая вклад тепловых компонент, зависящая от температуры [19]. Учет зависимости от температуры функции  $\Gamma$  позволил достоверно описывать результаты

Параметры начала фазового перехода

Материал	$P_f$ , GPa	$kf$ , kJ/g
SiO <sub>2</sub>	11	2.50
MgO	325	2.50

по ударно-волновому нагружению как сплошных, так и пористых образцов, что существенно при расчетах с учетом фазовых переходов, в широком диапазоне значений давления и пористостей. С учетом равенства температур компонентов и уравнений состояния каждого компонента находятся ударные адиабаты многокомпонентной смеси.

В области фазового перехода объемная доля  $\alpha$  фазы низкого давления переходит в фазу высокого давления, при этом ранее было показано, что зависимость  $\alpha$  от внутренней энергии близка к линейной. На основании экспериментов определяется значение давления, соответствующее началу процесса фазового перехода [20]. В расчетах ударной адиабаты рассматриваются три участка моделирования для материалов, испытывающих полиморфный фазовый переход. До начала фазового перехода  $\alpha = 0$ ; на втором участке значение  $\alpha$  линейно возрастает в зависимости от внутренней энергии  $\alpha = (E - E_b)/kf$ , при этом  $kf = E_f - E_b$ , ( $E$  — текущая внутренняя энергия,  $E_b$  — внутренняя энергия в начале фазового перехода,  $E_f$  — внутренняя энергия, когда весь материал перешел в фазу высокого давления). Окончание фазового перехода определяется полным переходом фазы низкого давления в фазу высокого давления, далее расчет выполняется при  $\alpha = 1$ . При этом следует отметить, что значение  $kf$ , связывающее объемную долю  $\alpha$  и внутреннюю энергию, определенное для одного значения пористости образца, позволяет достоверно описывать и другие значения пористости исследуемого материала. Значения давления, при котором начинается фазовый переход  $P_f$  и параметра  $kf$  приведены в таблице.

#### 4. Результаты моделирования

Расчет ударных адиабат для фазы низкого давления MgOI и фазы высокого давления MgOII, а также кривая, описывающая область фазового перехода MgO в переменных давление–плотность, приведены на рис. 1. Здесь же показаны данные полученные на основании экспериментов [28,29], а также зависимость давления от плотности мантии Земли, полученные по модели PREM [30]. Для сравнения приведены границы областей фазовых переходов SiO<sub>2</sub> и MgO, а также значение давления в центре Земли.

Для проверки достоверности описания смесей оксидов с другими материалами выполнены расчеты для смесей, по которым имелись экспериментальные данные по

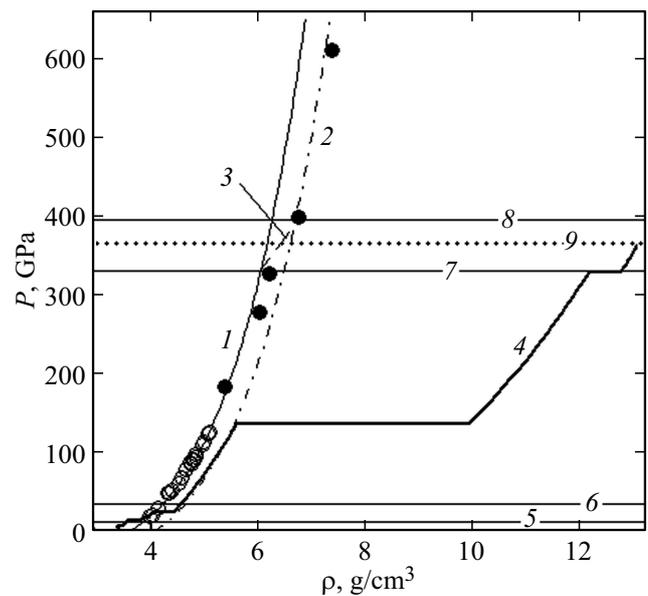


Рис. 1. Ударные адиабаты для MgO. Расчетные кривые: 1 — MgOI, 2 — MgOII, 3 — фазовый переход MgO, 4 — данные PREM [30]; сплошные линии: 5 — начало фазового перехода SiO<sub>2</sub>, 6 — окончание; 7 — начало фазового перехода MgO, 8 — окончание; 9 — давление в центре Земли. Данные: светлые кружки [28], темные кружки [29].

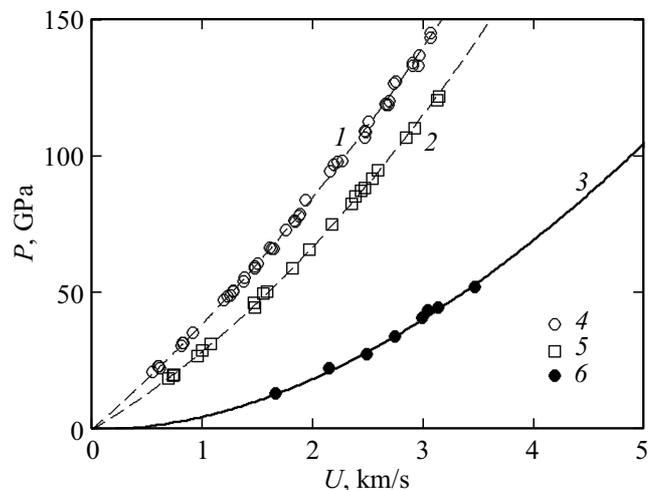
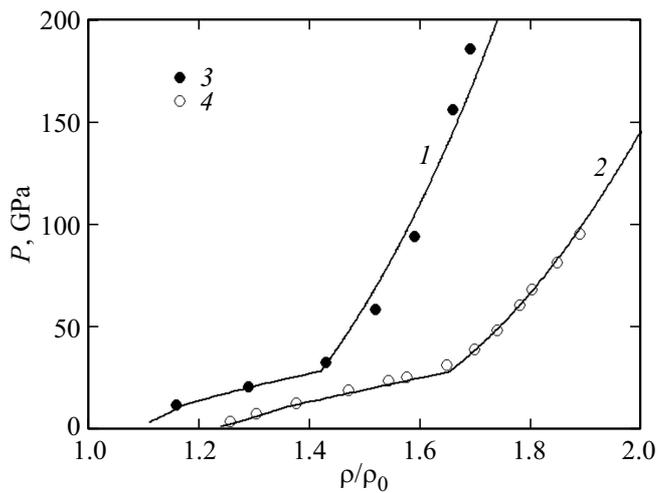


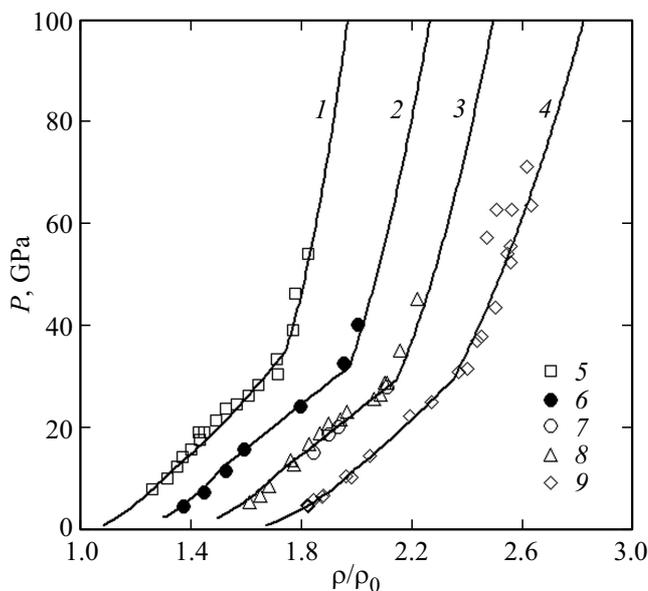
Рис. 2. Ударные адиабаты периклаза, корунда и смеси MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Расчет: кривая 1 — MgO, 2 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 — смесь MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Данные: 4, 5, 6 [31].

ударно-волновому нагружению. Используя параметры, определенные для оксидов [20], непротиворечиво описаны данные для таких образцов на уровне точности экспериментов.

Результаты моделирования ударных адиабат периклаза MgO, корунда Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и их смеси в равных молярных объемах с плотностью  $\rho_0 = 2.118 \text{ g/cm}^3$  в сравнении с данными [31] в координатах давление — массовая скорость приведены на рис. 2. С учетом диапазона



**Рис. 3.** Ударные адиабаты смесей  $\text{SiO}_2$ . Расчет: кривая 1 — смесь  $\text{SiO}_2$  с вольфрамом, 2 — смесь  $\text{SiO}_2$  с алюминием. Данные: 3 [32], 4 [33].



**Рис. 4.** Ударные адиабаты смесей  $\text{SiO}_2$ . Расчет: кривая 1 — смесь с тефлоном; 2, 3 — с парафином, 4 — с эпоксидной смолой. Данные: 5, 8 [34], 6, 9 [31], 7 [35].

давления экспериментальных данных до 150 GPa, данные расчеты проводились для фазы низкого давления  $\text{MgO}$ . Для сравнения там же приведены данные расчетов для компонентов рассматриваемой смеси. Результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным для чистых оксидов и их смеси.

Аналогичные расчеты были выполнены для различных составов смесей включающих  $\text{SiO}_2$  в качестве компонента. Результаты моделирования ударных адиабат смесей  $\text{SiO}_2$  с металлами в сравнении с данными [32,33] в координатах давление–сжатие приведены на рис. 3. Расчеты выполнены для смеси кварца с вольфрамом

плотностью  $\rho_0 = 10.19 \text{ g/cm}^3$  и смеси кварца с алюминием  $\rho_0 = 2.684 \text{ g/cm}^3$ . Для данных смесей расчет выполнен до значения давления 200 GPa. Кривая расчета для смеси с алюминием приведена со сдвигом по значению сжатия на 0.2, для наглядности. В этом диапазоне  $\text{SiO}_2$  испытывает фазовый переход, в качестве фазы высокого давления рассматриваем стишовит. По аналогии с [20] предполагается, что кварц, минуя промежуточную фазу коэсит, переходит сразу в стишовит. Расчет термодинамических параметров для смеси с учетом фазового перехода  $\text{SiO}_2$  после окончания фазового перехода выше 40 GPa соответственно выполнен для смесей вольфрама и алюминия со стишовитом. С учетом наблюдавшейся диссоциации  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  в окислы  $\text{MgO}$  и  $\text{SiO}_2$  в виде стишовита при значении давлений 33 GPa [6] можно предположить, что и для энстатита при этом значении давления также будет присутствовать стишовит. Результаты расчета не противоречат этому предположению. Согласно расчету, при давлении 33 GPa большая часть  $\text{SiO}_2$  перешла в фазу высокого давления.

Результаты расчетов для различных составов смесей органических материалов и  $\text{SiO}_2$  в качестве компонента, а также экспериментальные данные [31,34,35] приведены на рис. 4. Используя авторский подход, достоверно описаны экспериментальные результаты ударно-волнового нагружения смесей  $\text{SiO}_2$  с тефлоном —  $\rho_0 = 2.38 \text{ g/cm}^3$  (кривая 1); с парафином —  $\rho_0 = 1.92 \text{ g/cm}^3$  (кривая 2),  $\rho_0 = 1.78 \text{ g/cm}^3$  (кривая 3); с эпоксидной смолой —  $\rho_0 = 1.66 \text{ g/cm}^3$  (кривая 4). Кривая расчета 2 для смеси с парафином приведена со сдвигом по значению сжатия на 0.2, кривая 3 — со сдвигом 0.4, кривая 4 — со сдвигом 0.6. В [24] показана возможность моделировать параметры смеси с двумя компонентами, испытывающими фазовый переход при ударно-волновом нагружении. Получено достоверное описание имеющихся данных, которые получены на основании экспериментов.

Исходя из данных экспериментов, в которых регистрировалась диссоциация силикатов магния под давлением, выполнена проверка предположения о возможности рассмотрения данных материалов как смесей оксидов. Проведено моделирование ударно-волнового нагружения смеси оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  в соответствующем стехиометрическом соотношении 1:1 и сравниваются с данными, полученными на основании экспериментов для энстатита. Результаты моделирования для образцов с  $\rho_0 = 3.01 \text{ g/cm}^3$  показаны на рис. 5 в координатах волновая и массовая скорости. При этом значение пористости, которое определяется как отношение плотностей монолитного материала и плотности образца,  $m = 1.03$ , рассчитано по среднему значению образцов, использовавшихся в экспериментах. Здесь же показаны данные двух групп экспериментов, имеющих среднюю плотность образцов  $3.01$  и  $2.95 \text{ g/cm}^3$  [31]. Отклонение, в частности, объясняется разбросом значений плотности.

Результаты моделирования для пористых образцов энстатита, имеющих значения плотности  $\rho_0 = 2.836 \text{ g/cm}^3$ , при этом значение пористости  $m = 1.1$ , приведены на

рис. 6. Также приведены данные, полученные на основании экспериментов [31]. С учетом диапазона данных рис. 5,6, использовавшихся для верификации расчетов до 120 GPa, моделирование выполнено с учетом фазового перехода SiO<sub>2</sub>.

Расчет для образцов энстатита, имеющих значения плотности  $\rho_0 = 4.10 \text{ g/cm}^3$ , охватывающий диапазон до 1400 GPa и данные экспериментов [10,37,38], показан на рис. 7. В данном случае учтен фазовый переход MgO. Проведенные расчеты по термодинамически равновесной модели подтвердили возможность моделирования высокоэнергетического нагружения силикатов магния, рассматривая их как смесь SiO<sub>2</sub> и MgO в соответствующем стехиометрическом соотношении. Для MgSiO<sub>3</sub> это 1:1, для Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> — 1:2, как было показано ранее в [20].

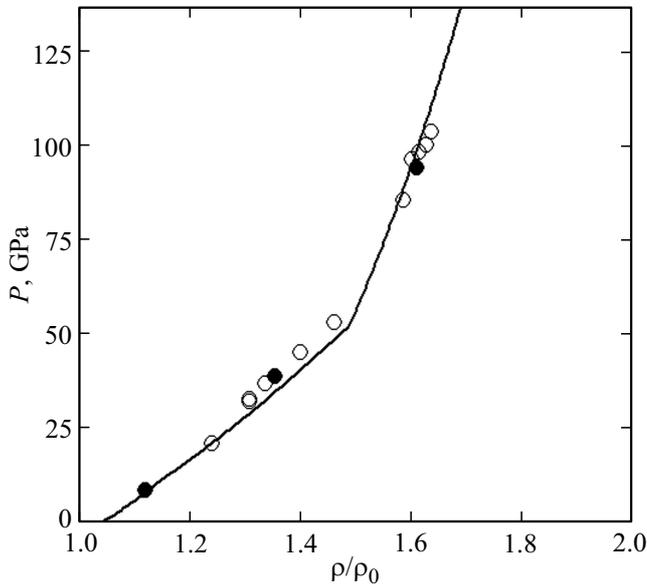


Рис. 5. Ударная адиабата энстатита. Расчет — сплошная кривая. Данные: [31].

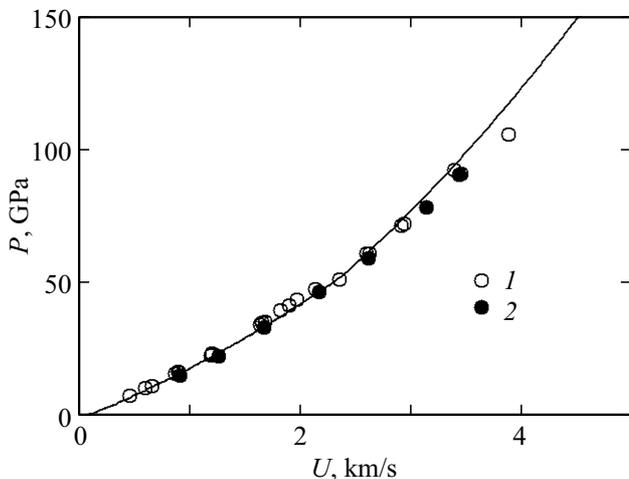


Рис. 6. Ударная адиабата пористого энстатита. Расчет — сплошная кривая. Данные: [31].

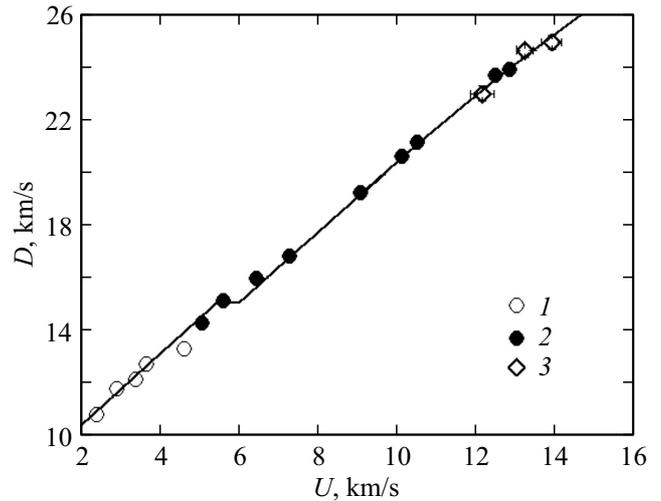


Рис. 7. Ударная адиабата энстатита. Расчет — сплошная линия. Данные: 1 [35], 2 [36], 3 [37].

## 5. Заключение

С учетом экспериментально наблюдавшейся диссоциации силикатов магния в окислы MgO и SiO<sub>2</sub> [6] можно предположить, что фазовый переход SiO<sub>2</sub> в шестовит вносит свой вклад в изменение плотности верхней мантии Земли в районе значений давления 30 GPa, которое соответствует фазовому переходу SiO<sub>2</sub>. Скачок плотности мантии Земли в области 330 GPa согласно [30] соответствует области фазового перехода MgO. На основе анализа имеющихся данных значение  $P_f$  для MgO было скорректировано до 325 GPa по сравнению с [20]. Область фазового перехода MgSiO<sub>3</sub> из фазы низкого давления в фазу высокого давления определена в диапазоне 300–400 GPa [38], что подтверждает оправданность использования данного значения  $P_f$ . Показано, что рассматривая силикаты магния при высоких динамических нагрузках как смесь компонентов, можно получить достоверное описание поведения исследуемого материала в диапазоне значений давления до 1.4 ТПа. Описание сложного вещества как смеси компонентов для описания карбидов приведено в [20]. Авторская модель позволяет достоверно описывать фазовые переходы всех компонентов, входящих в состав исследуемого материала. Наличие дополнительных экспериментальных данных могло бы помочь в уточнении области фазовых переходов компонентов и внести ясность в вопрос о наличии фазового перехода высокого давления для SiO<sub>2</sub>, дискуссия о котором идет уже долгое время.

Непротигворечивость модельных расчётов результатам, полученным в экспериментах для MgSiO<sub>3</sub>, показывает, что используемая методика может быть полезна для достоверного описания поведения материалов, испытывающих фазовые переходы при высокоинтенсивных нагрузках.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке госзадания НИР № FWGG-2021-0006.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] W.J. Borucki. *Rep. Prog. Phys.* **79**, 3, 036901 (2016).
- [2] P.E. Driscoll. *Planetary Interiors, Magnetic Fields, and Habitability*. In: *Handbook of Exoplanets* / Eds H. Deeg, J. Belmonte. Springer, Cham (2018).
- [3] T. Gasparik. *Phase Diagrams for Geoscientists*. Springer, N.Y. (2014). 462 p.
- [4] A.R. Oganov, R. Martoňák, A. Laio, P. Raiteri, M. Parrinello. *Nature* **438**, 04439, 1142 (2005).
- [5] K. Umemoto, R.M. Wentzcovitch, P.B. Allen. *Sci.* **311**, 5763, 983 (2006).
- [6] M. Kumazawa, H. Sawamoto, E. Ohtani, K. Mazaki. *Nature* **247**, 356 (1974).
- [7] E. Ohtani. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.* **49**, 253 (2021).
- [8] W. Xu, C.L. Bertelloni, L. Stixrude, J. Ritsema. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **275**, 78 (2008).
- [9] T.S. Sokolova, P.I. Dorogokupets, A.I. Filippova. *Phys. Chem. Minerals* **49**, 9, 37 (2022).
- [10] M. Millot, S. Zhang, D.E. Fratanduono, F. Coppari, S. Hamel, B. Militzer, D. Simonova, S. Shcheka, N. Dubrovinskaia, L. Dubrovinsky, J.H. Eggert. *Geophys. Res. Lett.* **47**, 4, e2019GL085476 (2020).
- [11] R.M. Bolis. *Investigations of high pressure phase diagrams of MgO–SiO<sub>2</sub> systems with laser shock compression*. Physics. Université Paris Saclay (COmUE), English. NNT: 2017SACLX056 (2017).
- [12] 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**, 6, 065701 (2012).
- [13] П.И. Дорогокупец, А.М. Дымшиц, Т.С. Соколова, Б.С. Данилов, К.Д. Литасов. *Геология и геофизика* **56**, 1–2, 224 (2015).
- [14] 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**, 18, 9475 (2016).
- [15] R. Musella, S. Mazevet, F. Guyot. *Phys. Rev. B* **99**, 6, 064110 (2019).
- [16] Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, Г.В. Симаков. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли* **29**, 10, 1 (1965).
- [17] Р.Ф. Трунин. *Исследования экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнения Гюгонно*. РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров (2006). 286 с.
- [18] М.А. Подурец, Г.В. Симаков, Р.Ф. Трунин. *Изв. АН СССР* **4**, 28 (1968).
- [19] К.К. Маевский. *ЖТФ* **91**, 5, 815 (2021). [К.К. Maevskii. *Tech. Phys.* **66**, 6, 749 (2021).]
- [20] К.К. Маевский. *ЖТФ* **92**, 12, 1820 (2022). [К.К. Maevskii. *Tech. Phys.* **67**, 12, 1580 (2022).]
- [21] К.К. Маевский. *Вестн. Томского гос. ун-та. Математика и механика* **79**, 111 (2022).
- [22] 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. *Computat. Math. Mathemat. Phys.* **46**, 5, 873 (2006).]
- [23] К.К. Maevskii. *J. Phys. Conf. Ser.* **894**, 1, 012057 (2017).
- [24] К.К. Maevskii. *AIP Conf. Proc.* **2051**, 1, 020181 (2018).
- [25] К.К. Maevskii, S.A. Kinelovskii. *AIP Conf. Proc.* **1783**, 1, 020143 (2016).
- [26] К.К. Маевский, С.А. Кинеловский. *ТВТ* **56**, 6, 876 (2018). [К.К. Maevskii, S.A. Kinelovskii. *High Temperature* **56**, 6, 853 (2018).]
- [27] К. Maevskii. *AIP Conf. Proc.* **2103**, 1, 020009 (2019).
- [28] Compendium of shock wave data / Ed. M. Thiel. Report UCRL-50108, Livermore, Lawrence Livermore Laboratory (1977). 401 p.
- [29] K. Miyanishi, Y. Tange, N. Ozaki, T. Kimura, T. Sano, Y. Sakawa, T. Tsuchiya, R. Kodama. *Phys. Rev. E* **92**, 2, 023103 (2015).
- [30] A.M. Dziewonski, D.L. Anderson. *Phys. Earth Planet. Int.* **25**, 4, 297 (1981).
- [31] *LASL Shock Hugoniot Data* / Ed. S.P. Marsh. Univ. California Press, Berkeley (1980). 658 p.
- [32] Р.Ф. Трунин, Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетов, Г.В. Симаков. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*. РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров (2006). 531 с.
- [33] М.А. Подурец, Г.В. Симаков, Р.Ф. Трунин. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли* **4**, 28 (1968).
- [34] Ю.Н. Жугин, К.К. Крупников, Н.А. Овечкин, Е.В. Абакшин, М.М. Горшков, В.Т. Заикин, В.Т. Слободенюков. *Изв. АН СССР. Сер. Физика земли* **10**, 16 (1994).
- [35] Г.А. Ададулов, А.Н. Дремин, С.В. Першин, В.Н. Родионов, Ю.Н. Рябинин. *ПМТФ* **4**, 81 (1962).
- [36] J.L. Mosenfelder, P.D. Asimow, D.J. Frost, D.C. Rubie, T.J. Ahrens. *J. Geophys. Res.* **114**, B1, B01203 (2009).
- [37] Y. Fei. *Nature Commun.* **12**, 876 (2021).
- [38] 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**, 6, 065701 (2012).

Редактор Е.В. Толстякова