

СКОРОСТЬ ЗВУКА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В СМЕСЯХ ЖЕЛЕЗА С СЕРОЙ И КРЕМНИЕМ

В. Ф. Анисичкин¹, С. А. Бордзиловский^{1,4}, С. М. Караханов¹,
В. Г. Половинкин², В. М. Титов^{1,4}, А. И. Туркин³

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, avf@hydro.nsc.ru

²Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск

³Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090 Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

По экспериментальным ударным адиабатам рассчитаны скорости звука в смесях железа с серой и кремнием при высоких давлениях. Методом боковой разгрузки измерены скорости звука за фронтом ударной волны в железосерных и железокремниевых образцах. Проведено сравнение расчетов и результатов измерений скорости звука с геофизическими данными для внешнего жидкого ядра Земли.

Ключевые слова: ударная адиабата, скорость звука, состав ядра Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Современные представления о составе ядра Земли базируются на том, что его основным компонентом является железо. В то же время экспериментальные данные, в частности [1, 2], свидетельствуют, что железо имеет большую плотность, но меньшую скорость звука, чем геофизические значения (PREM [3]) для вещества ядра Земли (рис. 1). В исследованиях, выполненных нами ранее [4], установлено, что одной из возможных добавок, которая удовлетворяет необходимым требованиям, может быть углерод в алмазной фазе в количестве 5 ÷ 10 % (по массе), входящий в состав ядра Земли. Другими легкими компонентами вещества ядра могут быть также достаточно распространенные в Солнечной системе сера, кремний и кислород, причем присутствие кремния считается более вероятным [5].

Многие из известных метеоритов имеют признаки того, что они образовались из прошедшего гравитационную дифференциацию вещества, т. е. в недрах массивных родительских тел, которые затем разрушились в результате взаимных столкновений или взрывов [6, 7]. Метеорит Richardton, являющийся типичным хондритом, содержит зерна никелистого железа и троилита (FeS), при этом масса

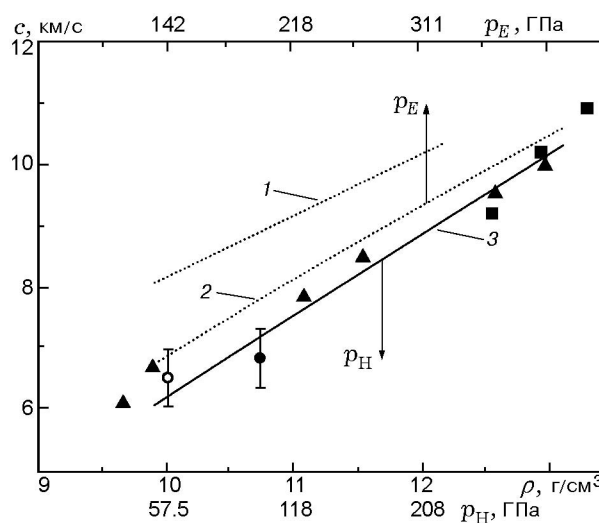


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения объемной скорости звука за фронтом УВ в железе:

▲ — [1], ■ — [2]; эксперименты авторов: ○ — $\rho_{00} = 7.40 \text{ г/см}^3$, ● — $\rho_0 = 7.82 \text{ г/см}^3$; 1 — скорость сейсмических волн во внешнем жидком ядре Земли (PREM) при соответствующих плотностях, но более высоких, чем вдоль УА железа, давлениях, $p_E > p_H$; 2 — расчет скорости звука в железе по формуле (2) при плотностях и давлениях ядра Земли (ρ , p_E); 3 — расчет скорости звука в железе по формуле (2) вдоль УА

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 39 и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-1886.2008.1).

серы составляет около 9 % массы железа и тролита в сумме [6].

Кремний является одним из основных элементов, из которых состоит вещество каменной мантии Земли. Кремний хорошо растворяется в расплавленном железе и может входить в состав жидкого слоя ядра, граничащего с мантией. В ряде работ, например [5, 8–13], на основе экспериментальных данных и расчетов предполагается, что железокремниевые смеси могут объяснять физико-механические свойства внешнего ядра Земли. С другой стороны, в [14] утверждается, что кремний не может быть единственной легкой добавкой в железоникелевое ядро Земли.

Ответ на обозначенные вопросы могут дать прямые измерения скорости звука, проводимые при высоких давлениях и температурах, в средах, моделирующих состав ядра Земли. Применяемые в настоящее время ударно-волновые методы исследования веществ при высоких плотностях энергии позволяют находить давление, плотность и скорость звука за фронтом ударной волны (УВ) вплоть до давлений, характеризующих условия в центральной части планеты. Результаты одного из первых исследований в этом направлении подтвердили роль железа как основного компонента ядра Земли [1]. Однако сопоставлять результаты измерений скорости звука за фронтом УВ и геофизические данные корректно только при равенствах плотностей и одновременно давлений, что не всегда можно получить при нормальной начальной плотности образцов в ударно-волновых экспериментах. Поэтому для решения поставленной задачи необходимы не только ударно-волновые измерения, но и методы пересчета полученных результатов на более широкий диапазон плотностей и давлений, характеризующих состояние вещества в глубинных зонах Земли.

Цель работы — измерение и проведение сравнительного анализа физико-механических характеристик смесей железа с добавками и имеющихся геофизических данных о давлении, плотности и скорости распространения сейсмических возмущений в ядре Земли (PREM [3]).

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ЗВУКА В СМЕСЯХ ЖЕЛЕЗА С СЕРОЙ И КРЕМНИЕМ

Уравнения состояния веществ, известные из ударно-волновых исследований, в основном представлены в виде ударных адиабат (УА)

$D = D(u)$, где D — скорость УВ, u — массовая скорость вещества за фронтом УВ (измеряемые в эксперименте величины). Для описания УА в координатах $D-u$ применяются различные аналитические зависимости, чаще кусочно-линейные или кусочно-квадратичные. Достаточно простой и в то же время хорошо аппроксимирующей экспериментальные данные в широком диапазоне параметров для многих веществ может быть зависимость типа [15]:

$$D = u + C_1 u^{1/2} + C_2, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — постоянные, подбираемые из условия наилучшего соответствия экспериментальным данным.

Для расчета объемной скорости звука c_b в веществе при высоких плотностях и давлениях в [15] предложено соотношение, проверенное сравнением с экспериментальными данными:

$$c_b = (D - u) \times \\ \times [2(D - u)/A - 1 + p_1/(\rho(D - u)^2) - u/D]^{1/2}, \quad (2)$$

которое позволяет находить скорость звука в веществе, если известна его УА. Здесь A — постоянная в уравнении касательной к УА в данной точке: $D = A + Bu$, p_1 — давление за фронтом ударной волны ($p_H = \rho_0 Du + p_0$) или давление в недрах Земли p_E [3], при котором рассчитывается скорость звука, ρ — плотность, ρ_0 — начальная плотность.

На рис. 1 показан результат расчета скорости звука за фронтом УВ в железе по формуле (2) (линия 3) вместе с известными [1, 2] и нашими (см. ниже) экспериментальными данными. При этом УА железа в исследуемом узком диапазоне изменения параметров, как наиболее точно соответствующая экспериментальным зависимостям, приведенным в [16], принималась следующей:

$$D = u + 1.983u^{1/2} + 2.29, \quad 1.4 \leq u \leq 8 \text{ км/с.} \quad (3)$$

На рис. 1 результаты расчета и ударно-волновых измерений скорости звука относятся к соответствующим плотностям ρ и давлениям p_H за фронтом УВ. Здесь также приведены скорости распространения сейсмических возмущений в ядре Земли (линия 1) и расчет скорости звука по соотношениям (2) и (3) в чистом железе при плотностях ρ и давлениях p_E , соответствующих недрам Земли (линия 2). Видно, что скорость звука в железе при параметрах ядра

Земли выше, чем вдоль УА (так как $p_E > p_H$), но ниже, чем в веществе ядра Земли. Следовательно, ядро Земли не может состоять только из железа. Никель, как показали расчеты, имеет близкие к железу физико-механические характеристики, его содержание в ядре Земли относительно невелико [6], поэтому отдельно влияние никеля на свойства смесей далее не учитывается.

Ударная сжимаемость смесей железа с серой в необходимых пропорциях ($\approx 10\%$ серы), насколько известно из литературы, ранее не исследовалась. Но известны УА серы и пирита (FeS_2) [16]. Поэтому УА смесей приходится рассчитывать по правилу аддитивности, исходя из ударных адиабат компонентов — железа и пирита, как более близкого по составу к необходимому. УА железа измерялась многими исследователями разными методами, принята за стандарт, и поэтому ее можно считать вполне достоверной, не влияющей на ошибку расчетов. Экспериментальная УА пирита приведена на рис. 2. В интересующем нас диапазоне давлений, выше давления фазового перехода, ее можно провести по трем или четырем верхним точкам. Более крутой (по трем точкам) ход УА пирита

$$D = u + 2.1u^{1/2} + 3.07 \quad (4)$$

приводит в расчетах к более высоким значениям скорости звука в смеси, и поэтому вместе с другими данными это выражение использовалось в оценках максимально возможных значе-

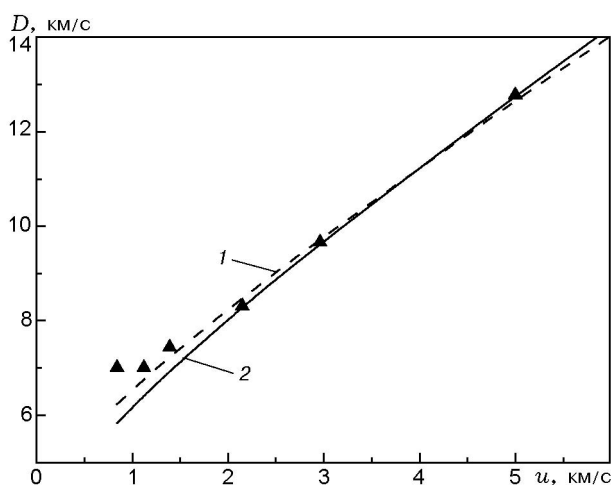


Рис. 2. Экспериментальная УА пирита (\blacktriangle [16]) и ее аппроксимации зависимостью (4) (линия 2) и зависимостью (5) (линия 1)

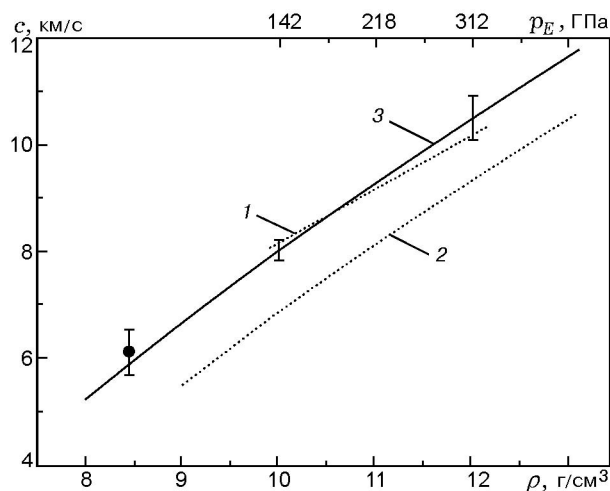


Рис. 3. Сравнение результатов расчета (линия 3 с интервалами ошибок) и измерений скорости звука (\bullet — c_E^* из таблицы) в смеси железа с 10 % серы:

1 — геофизические данные (PREM) для внешнего жидкого ядра Земли, 2 — расчет по формуле (2) объемной скорости звука в железе при параметрах (ρ , p_E) внешнего жидкого ядра Земли

ний расчетных величин c_b . Более пологая аппроксимация УА пирита:

$$D = u + 1.72u^{1/2} + 3.82 \quad (5)$$

принималась соответственно при расчетах минимально возможных значений c_b . (Диапазоны получаемых расчетных значений c_b отмечены интервалами ошибок на рис. 3.)

УА смеси веществ можно рассчитать по правилу аддитивности в различных вариантах. Например, при равных давлениях за фронтом УВ в индивидуальных веществах объем смеси за фронтом УВ находится как сумма объемов компонентов [17]. В этом случае УА смеси железа с пиритом (10 % серы, $\rho_0 = 7.06 \text{ г/см}^3$) получается следующей:

$$D = u + 2.0u^{1/2} + 2.46, \quad 2 \leq u \leq 5 \text{ км/с}, \quad (6)$$

если исходить из УА пирита (4).

Другой вариант расчета УА смеси заключается в следующем. Полагая, что компоненты смеси приобретают одинаковую массовую скорость u за фронтом, можно рассчитать скорость ударной волны D в смеси как скорость распространения возмущения в среде из чередующихся слоев двух различных материалов

[18]. Точное решение для скорости c распространения возмущения в среде из слоев, параллельных направлению распространения возмущения, имеет вид

$$\rho_{mix} c_{mix}^2 = \alpha \rho_1 c_1^2 + (1 - \alpha) \rho_2 c_2^2, \quad (7)$$

где индекс mix относится к смеси, а индексы 1 и 2 — к компонентам, α — объемная доля первого компонента. Такой расчет для смеси железа с пиритом (с УА пирита (4)) дает следующую УА:

$$D = u + 2.0u^{1/2} + 2.45, \quad 2 \leq u \leq 5 \text{ км/с}. \quad (8)$$

Видно, что УА (6) и (8) практически не отличаются.

Скорость распространения возмущения в среде из слоев, перпендикулярных направлению распространения возмущения, определяется по формуле

$$1/\rho_{mix} c_{mix}^2 = \alpha/\rho_1 c_1^2 + (1 - \alpha)/\rho_2 c_2^2, \quad (9)$$

что в результате приводит к следующей расчетной УА смеси железа с 10 % серы (с УА пирита (4)):

$$D = u + 1.91u^{1/2} + 2.54, \quad 2 \leq u \leq 5 \text{ км/с}. \quad (10)$$

Скорость распространения возмущения в реальной смеси должна быть промежуточной между двумя крайними вариантами расположения слоев веществ [18]. Поэтому далее ошибка в расчетах скоростей звука, обозначенная на графиках интервалами ошибок, определялась двумя принятыми вариантами УА пирита (4), (5) и двумя вариантами расчетов УА смеси — по (7) и (9).

На рис. 3 приведена зависимость скорости звука в смеси железа с пиритом от плотности и давления в ядре Земли (линия 3), рассчитанная по соотношению (2). Кроме того, приведены скорости распространения сейсмических возмущений в ядре Земли (PREM) (линия 1) и результаты расчета скорости звука по соотношению (2) в чистом железе при плотностях и давлениях, соответствующих недрам Земли (линия 2). Видно, что линии 1 и 3 согласуются в пределах расчетных ошибок.

Для расчета скорости звука в железокремниевой смеси также необходимо знать ее УА. На рис. 4 представлены некоторые из известных экспериментальных УА смесей железа с

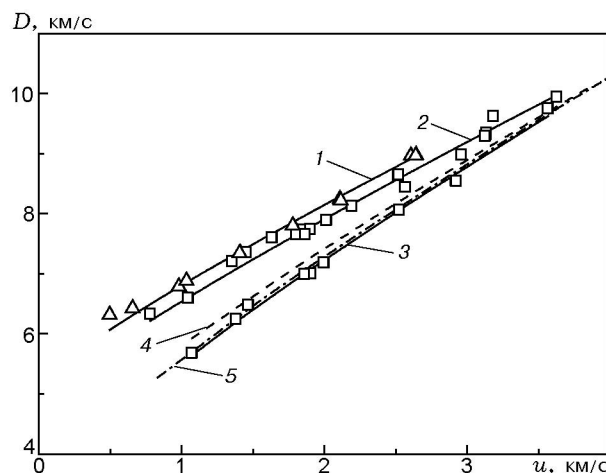


Рис. 4. Экспериментальные УА сплавов железа с кремнием (точки) и аппроксимации УА (линии) уравнениями (11)–(13):

эксперимент: \triangle — [19], 25 % Si, \square — [20], 19.8 % Si, \square — [20], 4 % Si, линии 1–3 — аппроксимация экспериментальных данных при соответствующих добавках Si; расчет (штриховые линии): 4 — по формуле (14), 10 % Si, 5 — по формуле (15), 5 % Si

кремнием [19, 20]. Сплошными линиями показаны интерполяции этих данных зависимостями вида (1). При интерполяции не учитывались начальные точки экспериментальных УА в низком диапазоне давлений, где возможны фазовые переходы, так как для расчетов нужны отрезки УА только при относительно высоких давлениях. В результате получены следующие аппроксимации УА смесей железа с кремнием:

$$D = u + 0.81u^{1/2} + 5.0 \quad (25 \text{ \% кремния, линия 1}), \quad (11)$$

$$D = u + 0.89u^{1/2} + 4.65 \quad (19.8 \text{ \% кремния, линия 2}), \quad (12)$$

$$D = u + 1.74u^{1/2} + 2.77 \quad (4 \text{ \% кремния, линия 3}). \quad (13)$$

Зависимости (11)–(13) более крутые, чем проведенные по всем экспериментальным точкам, и поэтому дают в расчетах, как будет показано ниже, более высокие значения скорости звука при равных плотностях. Такие максимально возможные, согласно расчетам, значения наиболее строги при оценке роли кремния как легкой добавки в ядро Земли.

Расчеты УА смесей с массовым содержанием 5 и 10 % кремния проводились по формулам (7) и (9). За исходные ударные адиабаты принимались УА железа (3) и УА железокремниевых смесей (11)–(13). Получены следующие зависимости (см. рис. 4):

$$D = u + 1.5u^{1/2} + 3.3$$

(10 % кремния, линия 4), (14)

$$D = u + 1.69u^{1/2} + 2.9$$

(5 % кремния, линия 5). (15)

На рис. 5 приведены результаты расчетов скорости звука по формуле (2) в смесях железа с кремнием при плотностях и давлениях внешнего ядра Земли. Интервалы ошибок показаны для смесей с максимальным (25 %) и минимальным (5 %) содержанием кремния и ограничивают результаты расчетов по наиболее крутым аппроксимациям экспериментальных УА (11)–(13) и по наиболее пологим, проведенным по всем экспериментальным точкам. Линии — средние значения расчетных скоростей звука.

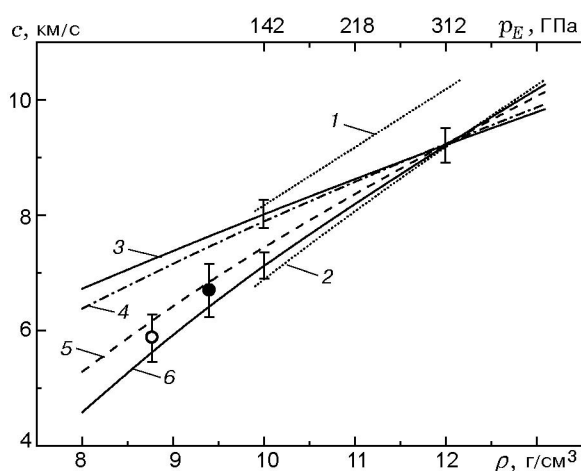


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения объемной скорости звука в смесях железа с кремнием:

1 — скорость сейсмических волн во внешнем жидком ядре Земли (PREM); 2 — расчет скорости звука в железе вдоль геотермы (ρ , p_E) по формуле (2); 3 (с интервалами ошибок) — 25 % Si, 4 — 19.8 % Si, 5 — 10 % Si, 6 (с интервалами ошибок) — 5 % Si; эксперимент: ○ — c_H из таблицы, ● — c_E^* из таблицы

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Образцы для измерений скорости звука готовили из порошка железа (реактив марки ОСЧ 13-2, зернистость 0.1 ÷ 1 мм) с добавлением элементарной серы (реактив ОСЧ 16-5, зернистость 0.05 ÷ 0.1 мм) или кремния (порошок с размером частиц 0.3 ÷ 1.5 мм, полученный измельчением синтетического монокристалла). Для подготовки образцов, содержащих оксиды железа, использовали реактив «железо закись» марки «Ч» ТУ ПО 13-57, предварительно проанализированный на содержание примеси Fe_2O_3 . Порошки тщательно перемешивали в агатовой ступке в течение 1 ч. Холодную прессовку образцов (при комнатной температуре) с добавлением кремния или оксида железа проводили в прессформе диаметром 18, с серой — диаметром 40 мм. Давление на штоке составляло около 2 ГПа. Длительность выдержки под нагрузкой — от 40 мин до 1 ч. Толщина спрессованных таблеток 5 ÷ 6 мм. Плотность оценивали на основании осреднения нескольких измерений высоты и диаметра спрессованных цилиндрических образцов и их взвешивания. Ее значение укладывалось в интервал 92.5 ÷ 95 % от теоретического максимального значения.

Необходимые давления в образцах получали с помощью ударников, разгоняемых взрывом. Ударники диаметром 50 мм и толщиной 5 мм изготавливали из дюралюминиевого сплава Д16Т. Скорость ударников определяли в отдельных независимых экспериментах при помощи электроконтактных датчиков, и она была равна 5.4 ± 0.1 км/с. Для измерения скорости звука в работе использовали метод боковой разгрузки, который предложен в [1], а в применении к нашим экспериментам подробно описан в [4]. При использовании этого метода скорость звука за фронтом УВ может быть рассчитана из выражения

$$c_H = D \sqrt{(\operatorname{tg} \alpha)^2 + [(D - u)/D]^2}.$$

Здесь D и u — скорость УВ и массовая скорость в образце соответственно, $\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла разгрузки (рис. 6), c_H — скорость звука за фронтом УВ. В опытах методом «вспыхивающих щелей» регистрировали моменты выхода и кривизну фронтов ударных волн, выходящих на торец образца и на тыльную поверхность экрана. По разнице во времени между

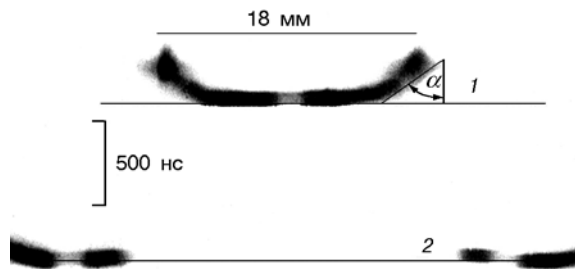


Рис. 6. Фоторегистрограмма фронтов УВ:
1, 2 — выход УВ на свободную поверхность образца и тыльную поверхность экрана соответственно, α — угол разгрузки

этими моментами определяли скорость D . Массовую скорость рассчитывали методом «отражения», используя изоэнтропу разгрузки, выходящую из состояния на ударной адиабате материала экрана, соответствующего осредненному значению скоростей ударников. Погрешность определения скорости УВ в образце можно оценить значением $\pm 2\%$. На рис. 6 приведена типичная фоторегистрограмма, полученная в экспериментах при высоких давлениях.

В качестве тестовых проведены опыты с образцами из прессованного порошка железа ($\rho_{00} = 7.40 \text{ г/см}^3$) и стали Ст.3 ($\rho_0 = 7.82 \text{ г/см}^3$). Результаты измерений скорости звука в железе приведены на рис. 1 вместе с расчетом и данными других авторов. (Оценка ошибки измерения скорости звука показала, что ее значение не превышает $7 \div 8\%$.)

Результаты экспериментов с различными образцами приведены в таблице, откуда видно, что давление p_H за фронтом УВ в железосернистых образцах на $\approx 27\%$ больше, чем давление в ядре Земли p_E при равных плотностях (из-за начальной пористости образцов). Поэтому, чтобы сравнивать ударно-волновые данные с геофизическими, необходимо корректировать полученное в эксперименте значение скорости звука c_H до меньших давлений, что можно сделать, используя выражение (2): $c_E^* = c_H(c_b(p_E)/c_b(p_H))$. Такая коррекция незначительно (на $\approx 4\%$) уменьшает скорость звука с 6.3 до 6.1 км/с при уменьшении давления. (Это означает, что скорость звука в рассматриваемой смеси слабо зависит от температуры.) На рис. 3 приведено откорректированное по давлению экспериментальное значение скорости звука c_E^* , соответствующее плотности и давлению в недрах Земли.

Для железокремниевых образцов с 10% кремния давление за фронтом ударной волны p_H мало отличается от давлений p_E в ядре Земли при равных плотностях (из-за начальной пористости образцов). Поэтому на рис. 5 измеренные для этих образцов скорости звука c_H показаны без коррекции. В образцах с добавлением 5% кремния давления за фронтом УВ p_H оказались на $\approx 20\%$ ниже, чем давления в ядре Земли p_E , при равных плотностях (из-за недостаточной пористости образцов). Поэтому, чтобы сравнивать ударно-волновые данные с геофизическими, необходимо, как и в случае

Параметры ударно-волнового нагружения и результаты экспериментов (c_H) для образцов из стали Ст.3, железа, железа с добавками серы, кремния и оксида железа (средние значения для нескольких опытов)

Образец	Количество опытов	ρ_{00} , г/см ³	ρ , г/см ³	p_H , ГПа	c_H , км/с	p_E [3], ГПа	c_E^* , км/с
Ст.3	2	7.82	10.7	94	6.8	195.6	—
	1	7.82	11.0	112	7.7	214.4	—
Fe (100%)	3	7.44	10.1	65	6.3	149.6	—
Fe/S 90/10	2	5.75	8.4	77	6.3	60.9	6.1
Fe/Si 90/10	3	5.81	8.8	75	5.9	74.0	5.9
Fe/Si 95/5	7	6.59	9.4	85	6.5	112	6.7
Fe/FeO 95/5	2	7.23	10.2	89	6.1	142	7.0

Примечание. $c_E^* = c_H(c_b(p_E)/c_b(p_H))$.

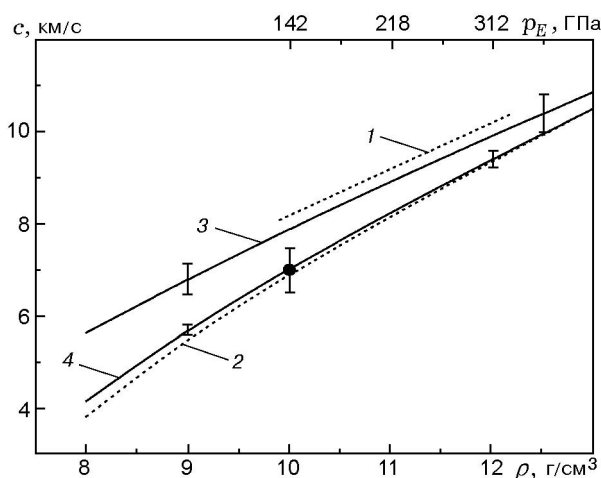


Рис. 7. Расчет скорости звука в смеси железа и 10 % кислорода (линия 3 с интервалами ошибок):

1 — геофизические данные (PREM) для внешнего жидкого ядра Земли; 2 — расчет по формуле (2) объемной скорости звука в железе при параметрах (ρ , p_E) внешнего жидкого ядра Земли; 4 — расчет скорости звука (с интервалами ошибок), • — измеренное значение c_E^* (см. таблицу) для смеси железа и 5 % FeO

с серой, корректировать полученное в эксперименте значение скорости звука c_H до больших давлений по (2). На рис. 5 приведено откорректированное экспериментальное значение скорости звука c_E^* , соответствующее плотности и давлению в недрах Земли. Видно, что для всех рассмотренных выше смесей экспериментальные данные попадают в интервал расчетных значений скоростей звука.

Вполне удовлетворительное в рамках поставленной задачи совпадение рассчитанных по (2) и измеренных скоростей звука для самых разных веществ, продемонстрированное выше, а также в [15], позволяет прогнозировать физико-механические свойства и других смесей. Известны экспериментальные УА Fe_2O_3 [21] и Fe_3O_4 [16], которые вместе с УА железа (3) позволяют по формулам (7) и (9) рассчитывать скорость звука в железокислородных смесях. На рис. 7 приведены результаты таких расчетов (с интервалами возможных ошибок) и результат эксперимента с добавкой в железо 5 % FeO.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Сравнение полученных в работе результатов с геофизическими данными, представлен-

ное на рис. 3, позволяет предположить, что сера в ядре Земли может объяснять его основные физико-механические характеристики — плотность, давление и скорость звука. При этом массовая концентрация серы уменьшается от $15 \pm 5\%$ у границы с мантией до $10 \pm 5\%$ у границы с внутренним ядром Земли. Такой результат может быть объяснен подъемом менее плотной, чем железо, серы или ее соединений, несмотря на конвективные тепловые течения в жидком ядре. Полученная концентрация серы в ядре согласуется с космохимическими данными, приведенными во введении.

Результаты для кремния, как единственной легкой добавки, скорее отрицательные. На рис. 5 линии 1 и 3 близки только при плотности ≈ 10 г/см³. Это означает, что плотность, давление и скорость звука смеси железа и 35 % кремния и верха ядра Земли близки. Однако при больших плотностях повышение концентрации кремния не приводит к заметному повышению скорости звука до необходимых геофизических значений. Следовательно, физико-механические характеристики только верха внешнего ядра на границе с силикатной мантией Земли могут объясняться присутствием кремния.

Если рассматривать кислород в качестве добавки, то, как следует из рис. 7, его массовое содержание в ядре должно быть не менее 20 %. Это означает, что более половины железа в ядре может быть в связанном состоянии, например, в виде FeO. При этом концентрация кислорода мало меняется с глубиной. Таким образом, кислород, как легкая добавка в железоникелевое ядро, может удовлетворять необходимым требованиям, но в больших концентрациях, чем сера.

В работе [22] приводятся расчетные и экспериментальные данные о достаточно высокой растворимости магния в железе при высоких давлениях. Возможно, что и другие более легкие, чем железо, элементы при высоких давлениях растворимы в жидком железе. Однако геохимически аргументированным можно считать только присутствие углерода, кислорода, серы и кремния в составе ядра Земли [5].

В заключение следует отметить, что полученные результаты совпадают с выводами работы [14] относительно роли серы, кремния и кислорода в качестве возможных легких компонентов земного ядра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Бражник С. Б., Владимиров Л. А., Сперанская М. П., Фунтиков А. И. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1061–1073.
2. Brown J. M., McQueen R. G. Phase transitions, Grüneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 GPa // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, N B7. P. 7485–7494.
3. Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25. P. 297–356.
4. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Караханов С. М., Бордзиловский С. А., 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.
5. Кусков О. Л., Хитаров Н. И. Термодинамика и геохимия ядра и мантии Земли. М.: Наука, 1982.
6. Вуд Дж. Метеориты и происхождение Солнечной системы: Пер. с англ. М.: Мир, 1971.
7. Анисичкин В. Ф. Взрываются ли планеты? // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 138–142.
8. Кормер С. Б., Фунтиков А. И. Исследование ударного сжатия ферросилиция и возможный состав ядра Земли // Физика Земли. 1965. № 5. С. 1–3.
9. Balchan A. S., Cowan G. R. Shock compression of two iron-silicon alloys to 2.7 Megabars // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, N 14. P. 3577–3588.
10. Lin J.-F., Heinz D. L., Campbell A. J., Devine J. M., Shen G. Iron-silicon alloy in Earth's core? // Science. 2002. V. 295. P. 313–315.
11. Dubrovinsky L., Dubrovinskaia N., et al. Iron-silica interaction at extreme conditions and electrically conducting layer at the base of Earth's mantle // Nature. 2003. V. 422. P. 58–61.
12. Lin J.-F., Campbell A. J., Heinz D. L. Static compression of iron-silicon alloys: Implications for silicon in the Earth's core? // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B1. P. 11,1–11,12.
13. Фунтиков А. И. Ударное сжатие сплавов железа с кремнием. Возможное содержание кремния в ядре Земли // Физика экстремальных состояний вещества — 2006. Черноголовка, 2006. С. 64–65.
14. Williams Q., Knittle E. P. Constraints on core chemistry from the pressure dependence of the bulk modulus // Phys. Earth Planet. Inter. 1997. V. 100. P. 49–59.
15. Анисичкин В. Ф. Расчет скорости звука за фронтом ударной волны в конденсированных средах // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 1. С. 129–132.
16. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
17. Трунин Р. Ф. Исследования экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнения Гюгоню. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
18. Кристенсен Р. Введение в механику композитов: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
19. LASL Shock Hugoniot Data / S. P. Marsh (Ed.). Berkeley: Univ. California Press, 1980.
20. Balchan A.S., Cowan G. R. Shock compression of two iron-silicon alloys to 2.7 Megabars // J. Geophys. Res. 1997. V. 71, N 14. P. 3577–3588.
21. Compendium of Shock Wave Data / M. Van Thiel (Ed.). Livermore: Lawrence Laboratory Report UCRL-50108, 1977. P. 396–398.
22. Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L., Kantor I., et al. Beating the miscibility barrier between iron group elements and magnesium by high-pressure alloying // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95, N 24. P. 245502-1–245502-4.

Поступила в редакцию 20/II 2008 г.