

УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ ДАННЫЕ КАК ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПРИСУТСТВИЯ УГЛЕРОДА В ЯДРЕ И НИЖНЕЙ МАНТИИ ЗЕМЛИ

В. Ф. Анисичкин

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

На основе анализа результатов ударно-волновых исследований и предложенного ранее метода нахождения скорости звука в веществах при высоких давлениях и плотностях, а также данных сейсмических исследований рассчитаны плотности при нормальных условиях и средние атомные массы гипотетических веществ, составляющих внутренние оболочки Земли. Этим данным оказалось достаточно для уточнения элементного состава земных недр. Показано, что железоникелевое ядро Земли должно содержать $\approx 10\%$ (по массе) углерода, частично в алмазной фазе. Нижний слой мантии, согласно расчетам, может содержать до 20% углерода, возможно поступившего из ядра.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Геофизические исследования позволили установить строение Земли в целом, которая, как оказалось, состоит из внутреннего твердого ядра, внешнего жидкого ядра, мантии и земной коры [1]. Но и каждая из земных оболочек неоднородна. Так, существенные данные о деталях строения ядра сообщаются в [2]. Однако элементный и химический состав земных недр во многом остается неопределенным. Поэтому для построения полной модели и уточнения состава Земли привлекаются данные других методов исследований свойств и поведения веществ при высоких давлениях, в том числе ударно-волновых методов.

В ударно-волновых экспериментах, как и в недрах Земли, достигаются высокие давления (до нескольких сотен гигапаскалей) и плотности, в полтора–два раза превышающие плотности конденсированных веществ при нормальных условиях. Уникальность ударно-волновых экспериментов для рассматриваемой задачи заключается в том, что в них с высокой точностью, до долей процента, могут быть определены плотность, давление и внутренняя энергия практически для любых представляющих интерес веществ. Эти параметры состояния вещества рассчитываются из законов сохранения массы, импульса и энергии во фронте ударной волны (УВ):

$$\frac{\rho_1}{\rho} = \frac{D - u}{D}, \quad (1)$$

$$p = \rho_1 D u + p_1, \quad (2)$$

$$E = \frac{p + p_1}{2} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} \right) + E_1, \quad (3)$$

где ρ_1, ρ — плотности вещества, p_1, p — давления, E_1, E — внутренние энергии соответственно перед и за фронтом УВ; D, u — измеряемые в эксперименте скорость УВ и массовая скорость вещества за фронтом УВ. Соотношения (1)–(3) при разных мощностях УВ позволяют получить линию $E(p(\rho, \rho_1))$ на поверхности $E(p, \rho)$ калорического уравнения состояния вещества — ударную адиабату. Однако только этих данных недостаточно для построения полных уравнений состояния веществ. Непосредственные же измерения других параметров за фронтом УВ, например скорости звука или температуры, сложны и менее точны, чем в случаях расчета плотности и давления по уравнениям (1), (2).

С другой стороны, сведения о некоторых параметрах состояния вещества в недрах Земли и о ее внутреннем строении получены из высокоточных измерений скоростей сейсмических волн и изучения других особенностей их прохождения в теле Земли. Мощными источниками сейсмических волн являются землетрясения, а также подземные ядерные взрывы. Вещества в твердом состоянии пропускают как продольные, так и поперечные упругие волны, а в расплавленном состоянии — только продольные, что позволило выделить твердые и расплавленные оболочки в теле Земли. При скачкообразных изменениях плотности вещества в недрах происходит отражение и преломление сейсмических волн. Так было установле-

Таблица 1
 Параметры состояния вещества в недрах Земли [1]

Область Земли	h , км	ρ , г/см ³	p , ГПа	v_p , км/с	v_s , км/с
Центр	6371	13,012	363,24	11,241	3,565
Верх внутреннего ядра	5153,9	12,704	328,87	11,091	3,439
Низ внешнего ядра	5153,9	12,139	328,87	10,258	0,0
Верх внешнего ядра	2885,3	9,909	135,40	8,002	0,0
Низ мантии	2885,3	5,55	135,40	13,732	7,243

но общее внутреннее строение Земли.

Рост давления и плотности вещества земных недр от поверхности до центра Земли рассчитаны также непосредственно из сейсмических данных следующим образом. Скорости продольных (v_p) и поперечных (v_s) объемных сейсмических волн могут быть выражены через модуль сжатия k и модуль сдвига μ :

$$v_p = \sqrt{(k + 4\mu/3)/\rho}, \quad (4)$$

$$v_s = \sqrt{\mu/\rho}. \quad (5)$$

Из (4), (5) следует, что

$$k/\rho = v_p^2 - 4v_s^2/3. \quad (6)$$

С другой стороны, по определению

$$k = \rho(\Delta p/\Delta \rho), \quad (7)$$

а рост давления с глубиной подчиняется закону

$$\Delta p = \rho g(h)\Delta h, \quad (8)$$

где h — глубина, $g(h)$ — ускорение свободно-го падения, меняющееся с глубиной. Следовательно, соотношения (4)–(8) позволяют рассчитать рост давления и плотность вещества от поверхности и до центра Земли, так как известны размер и общая масса Земли. Такие расчеты, согласно [1], дают значения давления и плотности с точностью до нескольких процентов. Возможно, более строгий анализ закономерностей распространения сейсмических волн приведет к некоторому уточнению этих результатов. Расчетные значения температуры различаются у разных авторов иногда на тысячи градусов. Некоторые данные о внутреннем строении Земли и параметры состояния вещества у границ основных оболочек Земли приведены в табл. 1.

Однако судить о химическом и минералогическом составе ядра Земли и мантии только

по сейсмическим данным можно лишь приближенно.

Таким образом, для более полного сопоставления ударно-волновых и сейсмических данных необходимо знать ударные адиабаты (зависимости $p(\rho)$) и скорости звука за фронтом УВ в любых потенциально интересных в геофизическом отношении веществах, как известных, так и, возможно, весьма неожиданных, экзотических, не существующих при нормальных условиях. Но экспериментальные измерения скорости звука за фронтом УВ, как отмечалось выше, сложны, неточны и известны лишь для немногих, в большинстве своем непредставительных в геофизическом отношении, веществ. Поэтому нужен метод расчета, который на основе ударно-волновых данных и известных значений давления, плотности и скорости сейсмических волн (скорости звука) давал бы достаточно полные характеристики вещества в недрах Земли для его идентификации.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Соответствующий поставленной задаче метод решения предложен в [3–7]. С его помощью при известных высоких значениях давления, плотности вещества и скорости звука можно рассчитать плотность этого вещества при нормальных условиях (ρ_0) и эффективную атомную массу химических элементов ($\mu_{\text{эф}}$), входящих в вещество.

Метод расчета заключается в следующем. На основе анализа известных зависимостей $D(u)$ было обнаружено, что ударные адиабаты химических элементов, а также их смесей и химических соединений в конденсированном состоянии с хорошей точностью описываются обобщенными зависимостями $D(u)$, если известны их плотность при $T \approx 0$ и $p \approx 0$ (ρ_0), эффективная атомная масса входящих в них элементов и положение элемента в таблице Мен-

делеева [4, 5, 7]. У веществ, которые, как окажется, представляют интерес для рассматриваемой задачи, обобщенная ударная адиабата (при $u > 0$) имеет следующий вид:

$$D = u + 3,4u^{1/2} \left(\frac{\rho_0}{\mu_{\text{eff}}} \right)^{1/3} + 9,1 \left(\frac{\rho_0}{\mu_{\text{eff}}} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

где D и u выражены в км/с, ρ_0 — в г/см³, μ_{eff} — в г. При этом $\mu_{\text{eff}} = m_{\Sigma}/N_{\Sigma}$, где m_{Σ} — масса атомов вещества, совершающих независимые тепловые колебания, N_{Σ} — полное число атомов вещества в единице объема. Если в составе вещества есть водород, химически связанный с более тяжелыми атомами, и (или) углерод в алмазной фазе, то $m_{\Sigma} = M_{\Sigma} - M_{\text{H}} - M_{\text{C}}(1 - c_v(T, p)/3R)$, где M_{Σ} — полная масса атомов вещества, M_{H} — масса химически связанных атомов водорода, M_{C} — масса атомов углерода в алмазной фазе, $c_v(T, p)$ — удельная теплоемкость алмаза, зависящая от температуры и давления, R — универсальная газовая постоянная. Без химически связанного водорода и алмаза в составе вещества μ_{eff} равна средней атомной массе элементов, входящих в химическое соединение или в смесь веществ. Экспериментальные и теоретические обоснования такого расчета μ_{eff} приведены в [4–7]. (Эмпирическая зависимость (9) подобрана так, что хорошо описывает экспериментальные данные при достаточно высоких сжатиях веществ в УВ — $\rho/\rho_0 \approx 1,5 \div 2$ и более.)

Далее, в [5] на основе анализа экспериментальных данных и обнаруженного подобия ударных адиабат веществ одной группы с помощью теории подобия и размерностей получено соотношение

$$p = (\rho/\rho_1)\Delta p_x + p_1, \quad (10)$$

которое связывает давление p за фронтом УВ с приростом потенциальной («холодной») составляющей давления p_x . В (10) ρ_1 , p_1 — плотность и давление перед фронтом УВ при произвольных начальных условиях. Таким образом, соотношения (9), (10) позволяют рассчитывать ударные адиабаты любых веществ, кроме некоторых химических элементов [4–7], при произвольных высоких значениях начального давления и плотности. Но скорость УВ малой амплитуды приближается к объемной скорости звука в веществе, что и позволяет решить обратную задачу, а именно: при известной скорости звука (сейсмических волн) и известных высоком давлении и большой плотности найти плотность

этого гипотетического вещества при нормальных условиях и среднюю эффективную атомную массу составляющих его химических элементов. Как будет видно из дальнейшего, этих данных может быть достаточно для определения основных химических элементов, входящих в состав земных недр.

РАСЧЕТ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА ЗЕМНЫХ НЕДР

Одна из проблем состава вещества земных недр, и в частности ядра Земли, заключается в следующем. Основной элемент внутреннего твердого ядра и внешнего жидкого ядра Земли — железо. Об этом свидетельствуют высокая плотность земного ядра, широкая распространенность железа в Солнечной системе и необходимость высокой электропроводности внешнего жидкого ядра для поддержания работы геодинамо, создающего современное магнитное поле Земли. Но, как отмечается в [8], состоящее только из железа с примесью никеля ядро должно иметь почти в полтора раза большую плотность, чем в действительности, чтобы объяснить наблюдаемые особенности распространения сейсмических волн. Поэтому возникает проблема легкого элемента в составе земных недр — такого химического элемента, который, снижая общую плотность вещества ядра, повышал бы скорость звука в нем по сравнению с чистой железоникелевой смесью. Очевидно, что такими могут быть только достаточно распространенные в Солнечной системе элементы H, C, N, O, Mg, Si, S и, возможно, инертные газы.

Расчеты, проведенные по изложенному выше методу, показали, что в составе железного ядра Земли должен быть элемент, имеющий относительно высокую плотность в смеси, растворе или в химическом соединении с железом, но с малой атомной массой, т. е. с исключительно большим значением параметра ρ_0/μ_{eff} в формуле (9). Так, например, для жидкого ядра Земли вблизи его границы с твердым внутренним ядром планеты полное совпадение результатов расчетов и геофизических данных получается для гипотетического вещества с плотностью при нормальных условиях $\rho_0 = (7,4 \pm 0,1)$ г/см³ и эффективной атомной массой $\mu_{\text{eff}} = 36,0 \pm 0,5$. Видно, что железо и никель не могут быть единственными компонентами ядра Земли. (Плотность железа 7,85 г/см³, атомная масса 55,85; плотность

никеля 8,9 г/см³, атомная масса 58,7.) Согласно справочным данным по индивидуальным веществам, растворам и химическим соединениям железа, требуемым расчетным параметрам может удовлетворить только добавка углерода (из широко распространенных элементов). При относительно малой атомной массе его атомная концентрация как индивидуального вещества (очевидно, алмаза при высоких давлениях) и как вещества, растворенного в железе или входящего в карбиды железа, существенно выше, чем у других элементов. (Атомная масса углерода 12,01, плотность алмаза 3,51 г/см³; средняя атомная масса карбида железа Fe₃C 44,89, плотность 7,69 г/см³.) Добавка других легких элементов в чистом виде или в соединениях с железом снижает среднюю плотность вещества, но не увеличивает при этом расчетную скорость звука в веществе до требуемых геофизических значений. (Частично удовлетворяет расчетным параметрам и добавка водорода.) Этот результат не является неожиданным. Скорость продольных волн, например, в алмазе существенно выше, чем в других веществах и составляет 17,5 ÷ 18,6 км/с в зависимости от ориентации кристалла.

Фазовая диаграмма и растворимость углерода в железе при давлениях в сотни гигапаскалей недостаточно изучены. Будем считать, что содержание углерода, присутствующего как в виде карбида железа Fe₃C, так и растворенного в жидком железе, при высоких давлениях не превышает 6,7 % (по массе). Тогда дополнительный углерод в недрах Земли, согласно фазовой диаграмме углерода [9], может присутствовать в алмазной фазе.

Fe₃C (цементит) — метастабильная фаза, которая при медленном охлаждении расплава или при температуре несколько ниже темпера-

туры затвердевания распадается на свободный углерод и железо. Поэтому внутреннее твердое ядро Земли несколько ниже его поверхности может состоять из смеси железа, никеля и углерода в алмазной фазе.

Таким образом, в расчетах для железоникелевой смеси необходимо подбирать содержание алмазной фазы и углерода в составе раствора или карбидов такое, чтобы удовлетворить геофизическим значениям плотности, давления и скорости звука в веществе земных недр.

Далее в расчетах объемная скорость звука v_V для твердых оболочек Земли принималась в виде

$$v_V = \sqrt{v_p^2 - 4v_s^2/3}. \quad (11)$$

В расчетах не учитывались возможные ошибки геофизических данных, так как в [1] они не указаны. Приведенные ниже пределы возможных изменений долей компонентов в расчетных составах определяются, с одной стороны, тем, что тепловая составляющая давления (p_t) и рассчитанная по [10] температура принимали количественно допустимые значения [1], а с другой — тем, что плотность ρ_0 вышележащих слоев была не больше плотности ρ_0 нижерасположенных слоев. Возможные фазовые переходы при высоких давлениях в железе, никеле и их соединениях с углеродом не рассматривались. Для алмаза в расчетах, согласно [6], учитывалось изменение теплоемкости $c_v(T, p)$ и, следовательно, атомной массы μ_{eff} с изменением давления. Так, эффективная масса алмаза во внешнем ядре менялась от 0,68 μ_C до 0,5 μ_C , во внутреннем ядре составляла в среднем $\approx 0,3 \mu_C$, где $\mu_C = 12$. Для всего ядра Земли содержание никеля в железе принималось равным 7,5 %. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Значения величин в скобках относятся к менее вероятному варианту сохранения карбидов железа и никеля при температуре ниже температуры затвердевания смеси. Основным компонентом нижней мантии

Расчетные характеристики вещества земных недр

Область Земли	ρ_0 , г/см ³	μ_{eff} , Г	p_t , ГПа	C_{Σ} , %	Углерод, %	D
Центр	7,6 ± 0,1	39,0 ± 0,5	41,1 ± 15	3,4 ± 1 (7,4 ± 1)		$D = 10,46 + 1,54 u$
Верх внутреннего ядра	7,5 ± 0,1	38,2 ± 0,5	30,5 ± 10	4,5 ± 1 (8,6 ± 1)		$D = 10,35 + 1,54 u$
Низ внешнего ядра	7,4 ± 0,1	36,0 ± 0,5	54,9 ± 20	9,6 ± 1		$D = 10,26 + 1,55 u$
Верх внешнего ядра	7,2 ± 0,1	35,2 ± 0,5	30,0 ± 10	11,7 ± 1		$D = 8,002 + 1,6 u$
Низ мантии	3,5 ± 0,05	15,3 ± 0,2	25,5 ± 10	17,5 ± 2		$D = 10,89 + 1,56 u$

Примечание. C_{Σ} — суммарное массовое содержание углерода, p_t — тепловая составляющая давления.

Земли, в отличие от железоникелевого ядра, принимался гиперстен $Mg_{0,7}Fe_{0,3}SiO_3$ ($\rho_0 = 3,44 \text{ г/см}^3$) [1], устойчивый в условиях нижней мантии [11]. Ближе к поверхности Земли, согласно расчетам, содержание углерода в мантии падает. Добавка относительно небольших количеств ($\approx 1 \%$) других элементов еще позволяет согласовать расчетные и геофизические данные, но принципиально не влияет на результаты. Необходимость существенного присутствия углерода в составе земных недр остается.

В табл. 2 также приведены линейные аппроксимации полученных в промежуточных расчетах ударных адиабат вещества земных недр, которые могут быть полезны, например, в расчетах столкновения Земли с большим астероидом.

Итак, согласно расчетам твердое железоникелевое ядро Земли может содержать $3,4 \div 4,5 \%$ углерода в алмазной фазе (или состоять из карбидов железа и никеля и $0,7 \div 1,9 \%$ свободного углерода в алмазной фазе). Внешнее жидкое ядро может содержать $\approx 6,7 \%$ углерода в растворе и $2,9 \div 5 \%$ алмазной фазы углерода. Низ мантии Земли может содержать до $17,5 \%$ алмазных кристаллов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее существенным результатом является обязательное присутствие углерода (в том числе в алмазной фазе) как легкой добавки в веществе земных недр. Следует отметить, что присутствие углерода (наряду с другими возможными легкими компонентами) в железоникелевом ядре рассматривалось, например, в [12, 13]; в [13], в частности, — в твердом ядре в виде соединений Fe_3C , Fe_7C_3 и в жидком — дополнительно с примесью серы. Однако количественные аргументы в пользу углерода в алмазной фазе, насколько известно из публикаций, в настоящей работе приводятся впервые.

О существенном присутствии именно углерода в недрах Земли, возможно, говорят и следующие факты. Углерод является одним из самых тугоплавких и распространенных в Солнечной системе элементов. Первоначально в протопланетном облаке углерод мог входить и в состав пылевых частиц. Поэтому с началом образования планет углерод вслед за магнитными железоникелевыми частицами мог начать конденсироваться одним из первых, обра-

зовав железоуглеродные ядра планет [13]. Растворенный в железоникелевом расплаве углерод также мог оказаться в ядре и при гравитационной дифференциации вещества планеты. О присутствии в таком железе углерода говорят, например, анализы металлической составляющей железокосаменного метеорита, проведенные в [14]. В железе содержится до 50% (по объему) углеродных включений. Но считается, что такие метеориты могут быть осколками большого небесного тела, прошедшего гравитационную дифференциацию вещества по плотности [15]. Кроме того, многочисленные метеориты (углистые хондриты) могут быть представителями распыленной, а затем вновь консолидированной углеродсодержащей нижней мантии разрушенного небесного тела [16].

Другой аргумент в пользу углерода как основного легкого компонента земных недр заключается в следующем. Углерод — один из самых распространенных во Вселенной элементов. Атомы углерода многочисленны и в галактических, и в солнечных космических лучах. Трудно представить процесс, при котором в состав планет Солнечной системы вошли бы все основные тугоплавкие элементы приблизительно в космической распространенности, кроме углерода. Но углерода мало даже в атмосфере самой большой планеты — Юпитера. Атмосфера Юпитера состоит на 90% из водорода и на 10% из гелия. Следовательно, углерод в значительных количествах может находиться во внутренних областях планет. Это решает проблему местонахождения углерода.

В расчетах получены приблизительно равномерное распределение углерода во внешнем жидком ядре Земли и его высокая концентрация в нижнем слое мантии. Возможно, это объясняется следующими процессами. Скорость течений во внешнем жидком ядре Земли около нескольких километров в год [17]. Если вязкость в слое несущественно выше вязкости жидкого железа при нормальном давлении [18], то по закону Стокса, чтобы скорость всплытия относительно мало плотных алмазных частиц не превышала скорость течений в ядре, размер основной массы алмазных частиц должен быть порядка нескольких микрометров. Но более крупные частицы и частицы, попадающие в восходящие потоки, могли подниматься и накапливаться в нижнем слое мантии, внедряясь в нее.

В настоящее время установлено, что и в

твердой каменной мантии происходит медленное перемешивание вещества [19]. Поэтому возможно, что кимберлитовые породы, содержащие алмаз, представляют отдельные выходы наиболее поднявшихся к поверхности нижних слоев мантии, вмещающих углерод. Возможно, что алмазосодержащие породы оказались на поверхности Земли в результате события, предполагаемого в [16]. В обоих случаях образовавшиеся на ранних этапах развития Земли алмазные частицы должны быть включены в относительно более молодые мантийные породы, что подтверждается изотопными данными [20]. К этому следует добавить, что в [21] сообщается об обнаружении частично сохранившихся металлических пленок на природных алмазах и делается вывод об образовании алмазов в металлическом расплаве в недрах Земли, что также не противоречит результатам настоящей работы.

Возможно, что, поднимаясь из нижней мантии к поверхности, часть углерода гидрируется, образуя углеводороды. Поэтому сейсмическая томография мантии может быть полезна в поисках глубинных месторождений газа.

Алмазные монокристаллы, как акустически-, так и магнитно-анизотропные и поэтому ориентированные в магнитном поле Земли, возможно, объясняют и анизотропию внутреннего ядра Земли, выражающуюся в зависимости скорости сейсмических волн от ориентации ядра [8]. При этом ближе к центру Земли и с падением концентрации алмаза анизотропия ядра должна уменьшаться. Если карбиды железа еще устойчивы при температуре несколько ниже температуры плавления, то вблизи поверхности внутреннего ядра алмазных кристаллов не будет, так как весь углерод будет в составе карбидов и, следовательно, анизотропия будет максимальна в слое на некотором расстоянии от поверхности внутреннего ядра. Анизотропия внутреннего ядра должна иметь неоднородности в соответствии с неоднородностями внутреннего магнитного поля Земли, а ее центр должен быть слегка смещен, как и ось магнитного поля Земли. Соответствующие сейсмические латеральные неоднородности должны проявляться и в насыщенном алмазными кристаллами нижнем слое мантии. Именно эти особенности сейсмической анизотропии земных недр отмечаются в [8].

Специальные эксперименты показали, что монокристаллы алмаза направлением [111] оси симметрии ориентируются вдоль линий маг-

нитного поля, а направлением [100] — перпендикулярно. (Вытянутые монокристаллы ориентируются вдоль поля.) Но именно вдоль направления [100] скорость продольных волн в алмазе минимальна — 17,5 км/с (вдоль осей [111] и [110] — 18,6 и 18,3 км/с соответственно).

Для расчета анизотропии внутреннего ядра на основе полученных результатов необходимо знать скорости продольных волн в алмазе и железоникелевой смеси при высоких давлениях внутреннего ядра. Необходимо также более детально знать распределение углерода в ядре. Очевидно, что это задача отдельного исследования. Поэтому оценим пока в простейшем случае (по порядку величины), насколько могут различаться времена прохождения продольных волн в твердом ядре вдоль земной оси и в плоскости экватора.

Разность скоростей продольных волн в монокристаллах алмаза в разных направлениях при нормальных условиях достигает 6 %. Будем считать, что такое соотношение сохраняется и при высоких давлениях. Объемная концентрация алмаза при плотности $\approx 5 \text{ г/см}^3$ (в ядре) составляет, согласно табл. 2, в среднем $\approx 10 \%$ вдоль оси внутреннего ядра. Разность продольных скоростей минимальной будет в случае, если представить среду состоящей из параллельных чередующихся слоев алмаза и железоникелевой смеси, перпендикулярных направлению распространения волны — 0,6 %, так как продольная волна проходит только одну десятую часть своего пути по алмазу. Максимальная разность (6 %) соответствует ситуации, когда слои параллельны направлению волны, и волна распространяется по алмазным слоям независимо. Возможно, не исключено образование волокнистых структур, вытянутых вдоль магнитных линий, но более вероятно, что алмазные частицы располагаются в среде хаотично. Тогда передний фронт продольной волны будет проходить приблизительно $\sqrt[3]{0,1} \approx 0,46$ часть своего пути по алмазным частицам. Оси симметрии в алмазе ориентированы так, что если одна из осей [111] параллельна линиям магнитного поля, то перпендикулярны линиям магнитного поля равновероятно будут другая ось [111] и ось [100], ориентированные случайным образом в плоскости экватора. Поэтому разность скоростей в ортогональных направлениях уменьшится еще пропорционально коэффициенту $2/\pi \approx 0,64$. Следовательно, разность скоростей продольных волн вдоль земной оси и в плоскости экватора должна соста-

вить $6 \times 0,46 \times 0,64 \approx 1,8$ %. С учетом возможных ошибок расчета содержания алмаза во внутреннем ядре (см. табл. 2) эта разность должна составить $(1,8 \pm 0,6)$ %. В [8] со ссылкой на многочисленные сейсмические данные эта величина принимается равной ≈ 1 %. Если иметь в виду другие не учтенные в расчетах ошибки и приближенность геофизических данных, то соответствие можно считать удовлетворительным.

В заключение следует отметить, что вид фазовой диаграммы системы Fe–C может существенно зависеть от давления и температуры [13]. Но согласование ударно-волновых и сейсмических данных в расчетах предложенным методом достигается только с присутствием углерода в алмазной фазе в недрах Земли.

Таким образом, в работе на основе ударно-волновых и геофизических данных приведены аргументы, выделяющие углерод как основную легкую добавку в веществе земных недр. Предложено еще одно объяснение анизотропии внутреннего ядра Земли, в дополнение к известным, и еще одна версия происхождения алмазов.

Результаты работы могут быть подтверждены измерениями скоростей звука в алмазо-содержащих магнитно-ориентированных смесях и измерениями скоростей звука за фронтом УВ в алмазосодержащих железоникелевых сплавах, карбидах железа, других веществах, а также сравнением результатов с сейсмическими данными.

Автор признателен В. В. Митрофанову и В. М. Титову за внимание к работе и полезные замечания, А. И. Туркину — за предоставленные уникальные образцы алмазов, А. В. Анисичкину — за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жарков В. Н.** Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983.
2. **Адушкин В. В., Ан В. А., Овчинников В. М., Краснощеков Д. Н.** О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн PKiKP на расстояниях около 6° // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 3. С. 382–385.
3. **Анисичкин В. Ф.** Расчет отражения ударной волны в конденсированной среде // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 4. С. 150–153.
4. **Анисичкин В. Ф.** К расчету ударных адиабат химических соединений // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 151–153.
5. **Анисичкин В. Ф.** Обобщенные ударные адиабаты и нулевые изотермы элементов // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 2. С. 152–157.
6. **Анисичкин В. Ф.** Аномальная ударная сжимаемость и теплоемкость алмаза // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 1. С. 77–79.
7. **Анисичкин В. Ф.** Ударно-волновые данные и уравнения состояния конденсированных сред // Физическая механика неоднородных сред / Под ред. Г. В. Гадьяка. Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО АН СССР, 1984. С. 142–145.
8. **Кузнецов В. В.** Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167, № 9. С. 1001–1012.
9. **Sekine T.** Shock recovery experiment of carbon // Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials. Marcel Dekker, Inc., 1992. P. 311.
10. **Долгушин Д. С., Анисичкин В. Ф.** Расчет температуры за фронтом УВ в конденсированных средах методами теории термодинамического подобия // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 80–84.
11. **Serghiou G., Zerr A., Boehler R.** $(\text{Mg}_{0,7}\text{Fe}_{0,3})\text{SiO}_3$ -perovskite stability under lower mantle conditions // Science. 1998. V. 280. P. 2093–2095.
12. **Jana D., Walker D.** The impact of carbon on element distribution during core formation // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61, N 13. P. 2759–2763.
13. **Wood B. J.** Carbon in the core // Earth and Planetary Sci. Lett. 1993. V. 117. P. 593–607.
14. **Mostefaoui S., Hoppe P., El Goresy A.** In situ discovery of graphite with interstellar isotopic signatures in a chondrule-free clast in an L3 chondrite // Science. 1998. V. 280. P. 1418–1420.
15. **Маракушев А. А.** Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука, 1992. С. 208.
16. **Анисичкин В. Ф.** Взрываются ли планеты? // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 138–142.
17. **Голицин Г. С.** Принцип скорейшей реакции в гидродинамике, геофизике, астрофизике // Докл. РАН. 1997. Т. 356, № 3. С. 321–324.
18. **De Wijs G. A., Kresse G., Vocadlo L. et al.** The viscosity of liquid iron at the physical conditions of the Earth's core // Nature (UK). 1998. V. 392, N 6678. P. 805–807.
19. **Van der Hilst R. D., Widiyantoro S., Engdahl E. R.** Evidence for deep mantle circulation from global tomography // Nature. 1997. V. 386, N 6625. P. 578–584.
20. **Фоп Г.** Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989.
21. **Макеев А. Б., Филиппов В. Н.** Металлические пленки на природных алмазах (месторождение Ичетью средний Тиман) // Докл. РАН. 1999. Т. 368, № 6. С. 808–812.

*Поступила в редакцию 13/IX 1999 г.,
в окончательном варианте — 10/I 2000 г.*