
ДИНАМИКА РЕШЕТКИ
И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

УДК 536.421

Посвящается памяти А.В. Шубникова

О НЕОДНОРОДНОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ТВЕРДОГО ЯДРА ЗЕМЛИ

© 2012 г. С. А. Пикин

Институт кристаллографии РАН, Москва
E-mail: pikin@ns.crys.ras.ru

Поступила в редакцию 09.03.2011 г.

Проведено сопоставление различных геофизических данных и выводов теоретических моделей, которые могут дать информацию о поведении твердого и жидкого ядер Земли, а также о существовании переходного слоя как области температурного гистерезиса при относительно слабом фазовом переходе первого рода. Сделан вывод о неизбежности существования жидких включений в этой области, которые благодаря сложным конвективным процессам в жидком ядре участвуют в переносе легких веществ из некоторых участков поверхности твердого ядра. Пористость и проницаемость переходного слоя определяют сейсмоакустические неоднородности на этих участках, приходящих в соприкосновение с конвективными потоками в жидком ядре. В частности, это объясняет известный эффект “восток–запад”. Очевидно, что модель кристаллического ядра как альтернатива модели его металлического стеклоподобного строения при этом не является единственно возможной.

ВВЕДЕНИЕ

Поведение ядра Земли вызывает большой интерес с точки зрения термодинамики, сейсмоакустики, магнитогидродинамики и сопутствующих свойств. Наличие растущего твердого ядра, конвективных течений в жидком ядре, роль тектонических плит и процессов, протекающих в мантии, ставят все новые вопросы, хотя существуют весьма противоречивые ответы и на давно существующие. Трудность заключается в том, что исследование недр в большинстве случаев не может вестись непосредственно, а лишь косвенно, хотя систематические измерения магнитного поля Земли и многочисленные сейсмоакустические данные дают богатый материал для построения многих моделей поведения планеты. В настоящее время доминирует модель кристаллического железного внутреннего ядра с определенной кристаллографической анизотропией и некоторым текстурированием, но существует и представление о нем как о металлическом стекле, которое в основном является изотропным. Данные по распространению звука в разных областях ядра, в том числе на разных участках внутреннего ядра, являются основным источником информации и свидетельством о той или иной степени анизотропии звука по направлению распространения и затухания, а значит, о структуре и составе ядра. В данной работе сделана попытка проанализировать накопленные данные и объяснить их, исходя из идеи о стеклообразном строении металлического ядра с жидкими включениями на его внешней границе, которая подвергается неоднородным возмущениям благодаря конвективным движениям в жидком ядре.

НАБЛЮДАЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ
АНИЗОТРОПИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ
СЛОЕ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА

В [1, 2] упоминается о существовании некоторого приповерхностного слоя (кашеобразного — *mushy layer* [1]) толщиной 100–200 км, в котором наблюдаются эффекты анизотропии скорости и поглощения сейсмических волн. В [1] предполагается наличие в нем жидких включений с определенной пористостью и проницаемостью, в [2] говорится о моделях с частичным плавлением, текстурированием затвердевания, случайностью среды по распределению скорости звука, а также различной ориентацией кристаллов железа с гексагональной плотноупакованной решеткой. Однако связь изменения (около 10%) скоростей звука с анизотропией его поглощения в таких кристаллах остается предметом исследований.

С точки зрения стеклообразного фазового перехода [3] при затвердевании ядра Земли указанная прослойка ядра является переходной областью температурного гистерезиса (интервал между солидусом и ликвидусом), в которой существуют метастабильные области твердой и жидкой фаз, что характерно для перехода первого рода, в данном случае — близкого ко второму роду. В этой прослойке могут в течение очень долгого времени возникать и исчезать твердые и жидкие включения разного размера с протеканием в них различных химических реакций. Область температурного гистерезиса (порядка 100 К при данной зависимости температуры T от глубины Земли) определяет величины всех скачков при этом переходе и температурное поведение всех термоди-

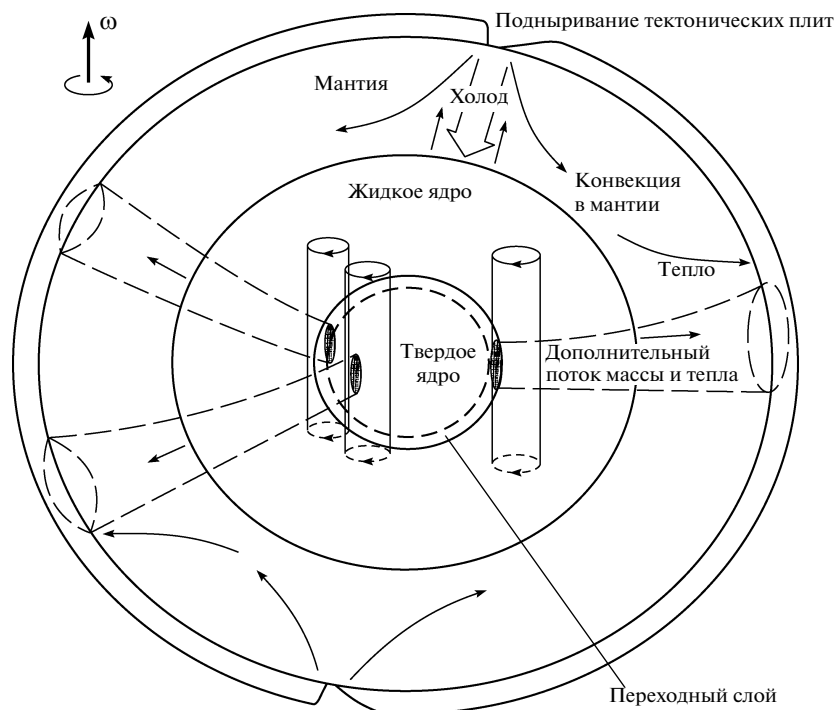


Рис. 1. Условная схема тепловых потоков во вращающейся Земле: верхняя мантия с тектоническими разрывами; нижняя мантия с крупномасштабной конвекцией; жидкое ядро; твердое ядро с переходным пограничным слоем; циклоны (тонкие линии), касающиеся внутреннего ядра в местах, помеченных темными овалами; тепловые потоки из внешнего ядра (прямые жирные стрелки); дополнительные потоки тепла и массы из выделенных участков внутреннего ядра (пунктирные линии). Рисунок выполнен с использованием данных [5, 6].

намических производных [4]. Вращение Земли может влиять на морфологию жидких включений, их размер и форму (например, они могут стать более плоскими и ориентированными), следовательно, на сейсмоакустические измерения¹. В частности, скорость звука оказывается больше вдоль полярной оси, а его поглощение больше в экваториальной плоскости.

Это происходило бы однородно по поверхности твердого ядра, если бы отсутствовали другие факторы, приводящие к неоднородности этих явлений вдоль данной прослойки на поверхности ядра. Одной из самых известных является аномалия, проходящая по так называемому Тихоокеанскому огненному кольцу, которое разделяет восточную и западную полусферы твердого ядра

¹ В [3] были сделаны оценки размеров жидких включений при больших значениях числа капиллярности $Ca = \mu_m \omega r_0 / \sigma$, где μ_m — вязкость расплава, ω — угловая скорость Земли порядка $7 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, σ — поверхностное натяжение капель FeS, r_0 — радиус сферического включения. Допуская, что $\mu_m \sim 10^{11} \text{ Па с}$, $\sigma \sim 1 \text{ Дж/м}^2$, $Ca = 10$, находим $r_0 \sim 10^{-6} \text{ м} = 10^4 \text{ \AA}$. Такой сферический зародыш по оценкам [3] может возникнуть за 10 с, а зародышу с размером $r_0 \sim 1 \text{ см}$ понадобились бы для его роста миллионы лет. Его уплощение, т.е. отношение длинной оси F к короткой h , составило бы значение 100.

Земли приблизительно под Центральной Азией [1, 2, 5, 6].

При этом восточное полушарие оказывается сейсмически более быстрым, более изотропным и более поглощающим звуковые волны по сравнению с западным. Кроме того, на этой линии раздела в экваториальной плоскости из твердого ядра идет более мощный поток тепла и легкого вещества к мантии Земли (ниже Малайзии) [5].

Показано [5], что эти геофизические явления связаны с конвективными процессами, происходящими при вращении Земли с учетом наличия у нее жидкого ядра, тектонических плит и мантии (рис. 1). Подныривание литосферных плит друг под друга ведет к тому, что в зоне подныривания холодное и плотное вещество очень медленно опускается с поверхности мантии к границе мантии и жидкого ядра, а затем так же медленно восходит к поверхности мантии. От границы жидкого ядра в мантию восходят тепловые потоки, более мощные в тех местах, где нисходят холодные мантийные потоки. Более быстрая конвекция в жидком ядре вызывается охлаждением от мантии и потоком тепла, а также потоком легкого материала от отвердевающего внутреннего ядра. Вращение Земли накладывает на эту картину дополнительные условия.

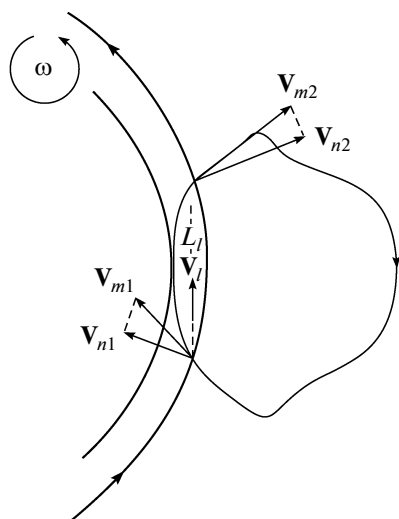


Рис. 2. Соприкосновение циклона в экваториальной плоскости с пористым пограничным слоем твердого ядра.

РОЛЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И ЕЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Математический анализ [7] показывает, что названные потоки при вращении жидкого ядра претерпевают существенные изменения. В частности, благодаря сильному влиянию силы Кориолиса появляются дополнительные конвективные потоки — цилиндры с геликоидальными потоками (циклоны и антициклоны), касающиеся твердого ядра (рис. 1) и позволяющие охлаждающейся мантии влиять на отвердевание внутреннего ядра в тех местах его поверхности, где такая конвекция допустима².

В частности, известен устойчивый антициклон под Южной Африкой [6], дополнительные циклоны существуют под Тихим и Атлантическим океанами [5]. Эти завихренности потоков в жидком ядре могут существовать стабильно в течение тысяч лет и сказываться на асимметрии геомагнитного поля, которое не является осесимметричным [8]. Благодаря влиянию мантии своеобразные пятна (сгустки силовых линий магнитного поля) существуют и в течение миллионов лет (например, в северном полушарии). При этом наблюдается так называемая секулярность магнитного поля Земли (изменения со временем по величине и направлению поля). Наблюдается и дрейф таких пятен в западном направлении. Все

² В [5] отмечается ведущая роль магнитного, вязкого и гравитационного моментов сил, которые вызывают также слабое вращение твердого ядра относительно нижней мантии (примерно на 8° за 100 миллионов лет. Флуктуации магнитного момента с 60-летней периодичностью могут вызывать осцилляции внутреннего ядра с угловой скоростью 0.1° в год.

это говорит о том, что конвективные потоки этого вида могут касаться внутреннего ядра на конкретных участках его поверхности относительно долго за историческое время. Благодаря различным условиям для развития конвекции на этих участках устойчивость данных потоков может быть различна. Таким образом, анизотропия внутреннего ядра Земли [9] получает все новые свидетельства.

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЕЩЕСТВА ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ

Соприкосновение указанных конвективных потоков с переходным поверхностным слоем (толщиной около 200 км) твердого ядра позволяет им входить в него как в пористую среду приблизительно на эту глубину.

Проницаемость K и пористость ε этого слоя определяют в нем среднюю скорость потока легкого вещества $u_l = \varepsilon v_l$, т.е. макроскопическую скорость фильтрации, определяемую как объемный расход жидкости через единицу площади в пористой среде; здесь v_l — средняя скорость частиц жидкости в порах. Пористость среды ε определяется как отношение объема пор ко всему объему выделенного объема среды. Набегающий (на входе) более тяжелый и холодный поток имеет скорость v_m (рис. 2). Поскольку скорость v_m существенно больше скорости v_l из-за трудностей фильтрации в пористом слое, на рис. 2 и 3, сделанным по мотивам [7], непрерывные потоки вещества в экваториальной плоскости не имеют формы окружностей. Здесь присутствуют тяжелая и легкая компоненты, однако тяжелая компонента (железо), проходя в пористую среду, адсорбируется в ней почти полностью, уменьшая пористость ε , а легкая компонента проходит пористый слой с макроскопической скоростью фильтрации u_l . Фильтрация жидкости происходит по закону Дарси [10]:

$$u_l = -\frac{K}{\mu_l} \nabla P, \quad (1)$$

где μ_l — коэффициент динамической вязкости жидкости во внутреннем ядре, P — эффективное давление в пористом слое в рассматриваемых динамических условиях.

В статических условиях (отсутствие конвекции в жидком ядре) благодаря диффузии имеется поток легкого вещества (сера, кислород, кремний) [11] так же, как и тепла, из твердого ядра, распределенный равномерно по его поверхности. Здесь рассматривается аномальный поток вещества как малая поправка к основному потоку, обусловленная дополнительным локальным конвективным течением, который связан с конкретным участком поверхности твердого ядра. На таком пори-

стом участке объемная доля твердых включений (железа, никеля) равна $\varphi_{\text{Fe}} = 1 - \varepsilon$, и она возрастает со временем из-за прибытия все новых порций твердых фракций вещества и увеличения количества адсорбируемого вещества. В конечном счете объемная доля принимает некоторое значение $\varphi_{\text{Fe}} < 1$, зависящее от коэффициентов скоростей адсорбции и десорбции, но большее первоначального (статического) значения. При этом тяжелые фракции расплава, которые не попадают в пористый слой, начинают обтекать твердое ядро, а жидкие фракции проходят этот слой насквозь благодаря фильтрации Дарси под действием разности давления на входе и выходе этого слоя.

На границе жидкого ядра и пористого слоя твердого ядра давление в нестатических условиях претерпевает скачок [12]:

$$\Delta P = -2\mu_m \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial v_n}{\partial x}, \quad (2)$$

где $\text{Re} = \rho v_m L / \mu_m$ — число Рейнольдса, L — характерная длина, которую примем порядка $1000 \text{ км} = 10^6 \text{ м}$, μ_m — коэффициент динамической вязкости многокомпонентного расплава в жидком ядре, v_m — скорость расплава, имеющая на входе значение v_{m1} , v_n — нормальная компонента скорости расплава (рис. 2). Производная $\partial v_n / \partial x$ может быть большой из-за торможения тяжелых фракций на входе. Если велика производная $\partial v_n / \partial x$, то давление на входе (2) может быть значительным. При этом скорость расплава v_n сильно замедляется на некоторой длине ξ , причем на границе жидкости и пористой среды нормальная компонента v_n непрерывна. На выходе из пористого слоя легкое вещество попадает в расплав, движущийся со скоростью v_{m2} . Здесь также имеется скачок (2) по давлению, но он имеет отрицательный знак, так как скорость расплава v_{m2} изменяется в сторону увеличения. Для простоты будем считать, что эффективное давление изменяется в пористом слое на величину порядка скачка (2). На границе раздела пористой среды с твердой непроницаемой средой должна обращаться в ноль лишь нормальная компонента скорости фильтрации. Касательная компонента, как известно, отлична от нуля, и вдоль границы может происходить фильтрация.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНЕГО ЯДРА И “КАШЕОБРАЗНОГО” СЛОЯ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА

Примем разность ΔP равной по порядку величины давлению в среде $P \sim 10^{-1} \text{ Мбар}$, вязкость $\mu_m \sim 10^{11} \text{ Па с}$ и $\rho \sim 10^4 \text{ кг/м}^3$ как максимально допустимые значения. Тогда из (2) можно оценить длину $\xi \sim \mu_m^2 (\Delta P \rho L)^{-1} \approx 100 \text{ м}$. Вообще вязкость расплава

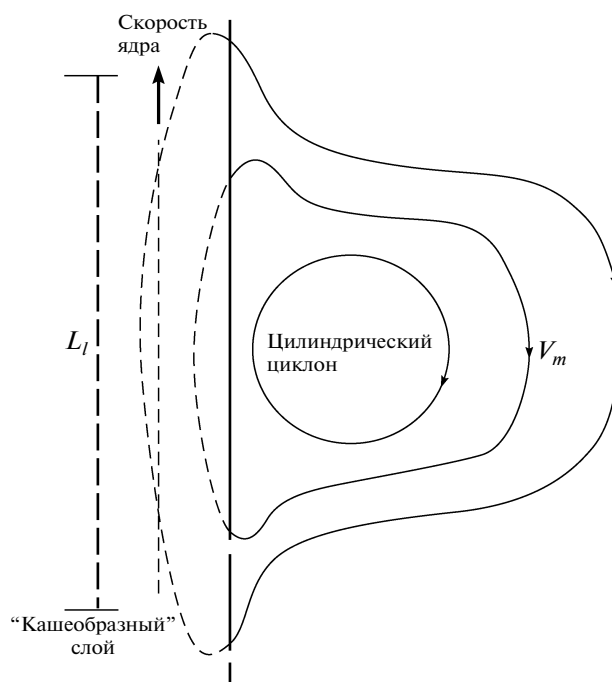


Рис. 3. Выделенный участок кашеобразного слоя, в который проникает циклон. Условно показаны пунктиром ориентации анизотропных жидких включений, параллельных скорости ядра и локальным скоростям проникающего циклона; разница в этой ориентации приводит к уменьшению средней анизотропии выделенного участка.

оценивается величиной $\mu_m \approx 10^7 - 10^{11} \text{ Па с}$ [13], предполагая ее высокой вблизи границы твердого и жидкого ядра [14]. Из [5] следует, что вязкость μ_m имеет порядок величины 10^9 Па с , если принять число Экмана $E = \mu_m / \rho \omega D^2 \sim 3 \times 10^{-4}$, где ω — угловая скорость Земли порядка $7.3 \times 10^{-5} \text{ 1/с}$, D — толщина жидкого ядра порядка 2000 км . Следует отметить, в литературе существует большой разброс в значениях вязкости, и некоторые авторы считают, что эти значения сравнимы с величиной вязкости воды [15–18], а типичные скорости конвективного движения в жидком ядре суть порядка $10^{-3} - 10^{-4} \text{ м/с}$.

Пористый слой состоит, видимо, из стеклообразных областей твердого железа с порами, в которых находятся в жидком состоянии легкие материалы, например сера, первоначально входившая в жидкое сернистое железо. Эта система твердых и жидких включений не находится в термодинамическом равновесии, и фазовое состояние включений может изменяться, по крайней мере, через очень долгое время. Выделение из FeS железа и серы, а также других легких фракций происходит благодаря химическим реакциям при термодинамических условиях затвердевания железного ядра. Возможно, эти процессы осуществляются из-за подвижных структурных дефектов твердого тела, скорость которых, как и скорость

взаимодиффузии реагентов химической реакции, в стекле выше, чем в кристалле [19]. По существующим представлениям дислокационное плавление кристаллов происходит при предельной плотности дислокаций 10^{13} м^{-2} , что приводит к значениям вязкости, регулируемой дислокациями, порядка 10^9 – 10^{16} Па с, т.е. более высоким по сравнению с ее значениями в стекле.

Необходимо отметить, что ранее предлагалась модель пористого кристаллического ядра, пропитанного металлическим расплавом иного состава с дендритной границей между жидким и твердым ядром [20]. В нем предполагалось наличие некоторых каналов (вертикальных, лишенных твердых фракций), по которым протекает легкая фракция [21].

Будем считать вязкость μ_l малой и оценим ее с помощью выражения (1), переписав его в виде

$$K \approx \varepsilon v_l \frac{L_l}{\Delta P} \mu_l, \quad (3)$$

где пористость $\varepsilon \sim 10^{-2}$ – 10^{-1} , $v_l \sim 10^{-6}$ – 10^{-4} м/с, длина пути фильтрации легкой фракции $L_l \sim 10^{-6}$ – 10^{-5} м. Тогда проницаемость K и вязкость легкой фракции μ_l оказываются связанными соотношением $K \sim 10^{-10}$ – $10^{-12} \mu_l \text{ м}^2$, где μ_l измеряется в единицах Па с. Например, при $\mu_l \sim 100$ Па с имеем $K \sim 10^{-10} \text{ м}^2$, и с уменьшением ΔP вязкость μ_l уменьшается, а проницаемость K увеличивается, что представляется маловероятным. Поэтому вряд ли разность ΔP имеет величину, меньшую 10^{-1} Мбар, а вязкость μ_m меньше 10^{11} Па·с. Это говорит о том, что в жидком ядре должна иметь место глобальная бестурбулентная циркуляция³ [13, 22]. Таким образом, можно говорить о двух разных коэффициентах вязкости μ_l и μ_m , относящихся к разным субстанциям: тяжелому расплаву в жидком ядре и легкой жидкости в твердом ядре с малой пористостью ε .

Ранее предполагалось некоторое промежуточное значение порядка $\mu_l \sim 100$ Па с для жидких включений в экваториальной области твердого ядра [23]. В то же время допускалось, что подразумеваемая вязкость твердого ядра означает возможность его деформирования и течения под влиянием вращательных напряжений и движений внешнего ядра [24]. Если эти огромные напряжения и деформации, возникающие при анизотропном растяжении, превышают порог упругости, то затруднительно говорить о чисто кристаллическом состоянии твердого ядра. Неравновесное стеклообразное состояние, возможно, присуще центральному ядру и отдельным фрагментам в его “кашеобразной” области.

³ Она может приводить к неадиабатическому распределению температуры в жидком ядре [13, 22].

Система пористого твердого материала и жидких капель, например серы, насыщающих поры, может быть термодинамически неравновесной из-за большого отношения поверхность/объем в малых порах и соответственно большой поверхностной энергии, пока свободная энергия не понижается из-за взаимодействия серы с матрицей (поверхностью пор) [25]. Выталкивание серы из пор происходит благодаря слабому взаимодействию серы с их поверхностью. Она легко просачивается и остается в порах, если энергия ее притяжения поверхностью больше, чем ее поверхностное натяжение. Меньшее поверхностное натяжение и большая термодинамическая стабильность характеризуют поры большего радиуса и вещество с меньшей удельной поверхностью пор и меньшей пористостью. Как отмечалось выше, жидкие капли, “закупоренные” в соответствующих порах, например, слоем окислов, могут достигать за весьма длительное время сантиметровых размеров.

Вязкость жидкой серы при давлении 9.7 ГПа и температуре 1067 К составляла 0.69 Па с по измерениям [26]. По данным [17] вязкость расплава Fe–FeS при сходных условиях была равна 0.036 Па с, причем вязкость расплава Fe₇₂S₂₈ была меньше, чем у расплава железа на 15–10%. Таким образом, присутствие малого количества серы понижает вязкость расплава, а вязкость самой серы может быть значительной. К сожалению, при сверхвысоких давлениях и температурах такие данные отсутствуют. Можно лишь думать, что в пористом слое Земли вязкость серы и других легких элементов не мала, но меньше вязкости расплава чистого железа.

Со временем по мере поступления конвективных потоков в выделенный участок пористого слоя его пористость ε может уменьшаться за счет увеличения доли твердой фракции. Длительность этого процесса велика и может составлять миллионы лет. Соответственно проницаемость этого участка K со временем также уменьшается. По оценке [23] проницаемость $K \sim 10^{-18} \text{ м}^2$, что, согласно (3), требует либо значения $\varepsilon \sim 10^{-9}$, либо гораздо меньшей скорости v_l при $\mu_l \sim 100$ Па с. Как известно, величины K и ε связаны между собой. Например, для осадочных пород известно полуэмпирическое соотношение [27, 28]:

$$K = d^2 \varepsilon^3 / 180(1 - \varepsilon)^2, \quad (4)$$

где d – эффективный размер твердого зерна в пористой среде. Можно ожидать, что некоторое подобие выражения (4) существует и в рассматриваемом случае. Сравнивая (3) и (4), получаем зависимость

$$\varepsilon d = \left[A v_l \mu_l \frac{L_l}{\Delta P} \right]^{1/2} \quad (5)$$

при малых ε : A – численный коэффициент. Отсюда видно, что очень малые ε приводят к нерезко большому d . Очень малые скорости $v_l \sim 10^{-12}$ м/с дают значение порядка $d \sim 10^{-6}$ м при $\varepsilon \sim 10^{-1}$. Приемлемыми оценками представляются величины $\varepsilon \sim 10^{-2}$, $v_l \sim 10^{-6}$ м/с, $\mu_l \sim 100$ Па с, которые, согласно (3)–(5), приводят к значениям $K \sim 10^{-12}$ м², $d \sim 10^{-2}$ м при $A \sim 100$. О возможности больших значений проницаемости и размера зерна матрицы сообщается в [29], где зерна имели размер 45 мкм, а проницаемость составляла величину 2×10^{-15} м² при $\varepsilon \sim 10^{-1}$, причем при больших d проницаемость K может оказаться еще больше.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В НЕОДНОРОДНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ

Таким образом, с течением времени объемная доля твердых включений возрастает до некоторого значения $\varphi_{Fe} = 1 - \varepsilon < 1$. Продольная скорость звука в смеси твердой и жидкой фракций определяется соотношением $c = ((K + 4/3M)/\rho)^{1/2}$, где K – модуль всестороннего сжатия, M – модуль сдвига. Как известно [30, 31], с увеличением малой объемной доли твердых включений плотность такой смеси ρ растет быстрее, чем уменьшается ее сжимаемость, что объясняет начальное уменьшение скорости звука c . Но при больших объемных долях включений сжимаемость смеси $1/(K + 4/3M)$ уменьшается быстрее, чем растет плотность ρ , что приводит к увеличению скорости звука в таком композитном материале. Экспериментально было показано, что в композите скорость звука c при больших волновых векторах растет с увеличением φ_{Fe} и становится больше, чем в чистой жидкости, так как в твердых включениях она больше, чем в жидкости. Напротив, при малых волновых векторах звука его поведение полностью противоположно: скорость c уменьшается с увеличением φ_{Fe} и даже падает ниже скорости звука в чистой жидкости.

Расчеты [31] показывают, что скорость звука в композите описывается соотношением

$$c = c_1 \sqrt{\beta \gamma^2 [(1 - \varphi_{Fe})\beta \gamma^2 + \varphi_{Fe}](1 - \varphi_{Fe}) + \varphi_{Fe}\beta}^{-1}, \quad (6)$$

где β – отношение плотности твердой фракции ρ к плотности жидкости ρ_l , $\gamma = c_2/c_1$, c_1 – скорость звука в жидкости, c_2 – скорость звука в твердом теле. Из (6) видно, что при достаточно больших долях φ_{Fe} продольная скорость звука увеличивается с ростом объемной доли твердой компоненты. Таким образом, эта часть пористого слоя становится более “сейсмологически быстрой”. Однако скорость звуковых волн в стекле как твердой компоненте меньше, чем она была бы в кристалле, например, благодаря дислокационному механизму плавления.

В то же время дополнительное конвективное перемешивание в ней должно приводить к большему поглощению звука и его меньшей анизотропии (рис. 3), так как циклоны, касающиеся внутреннего ядра, разрушают ориентационную упорядоченность анизотропных жидких включений в пористом слое [3]. Поскольку ось упомянутого циклона параллельна оси вращения Земли, то он касается внутреннего ядра в его экваториальной части, и дополнительный конвективный поток легких химических элементов лежит примерно в экваториальной области Земли, что определяет направление выхода этого потока на ее мантийную поверхность [5, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ имеющихся экспериментальных данных и теоретических подходов позволяет сделать следующие выводы. Дополнительные потоки массы связаны с конкретными участками переходного слоя внутреннего ядра, которых касаются циклоны конвективного движения во вращающемся жидком ядре. Эти участки тонкого пограничного (пористого) слоя служат местами фильтрации расплава, дополнительной адсорбции в них железа и выделения легких элементов из них во внешнее ядро. Повышенная доля тяжелых фракций на данных участках твердого ядра приводит к повышению скорости продольного звука, а просачивание капель легких элементов – к увеличению его затухания и уменьшению анизотропии распространения звука. Представляется, что не новая идея о стеклообразном твердом ядре с жидкими включениями в пограничной области может объяснить некоторые сейсмологические особенности.

Следует подчеркнуть, что используемые оценки вязкости тяжелого расплава и легкой фракции, проницаемости и пористости выделенных участков носят косвенный характер и скорее указывают на тенденции в поведении этих величин.

Работа поддержана грантом по Программе Президиума РАН “Физика сильно сжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cao A., Romanowicz B. // Earth Planet Sci. Lett. 2004. V. 228. P. 243.
2. Yu W., Wen L. // Earth Planet Sci. Lett. 2006. V. 245. P. 581.
3. Пикин С.А., Горкунов М.В., Кондратов А.В. // Кристаллография. 2010. Т. 55. С. 663.
4. Пикин С.А. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. С. 746.
5. Aubert J., Amit H., Hulot G. et al. // Nature Lett. 2008. V. 454. P. 758.
6. Lister J. // Nature. 2008. V. 454. P. 701.

7. *Breuer M., Manglik A., Wicht J. et al.* // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 183. P. 150.
8. *Kelly P.D., Gubbins D.* // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 128. P. 315.
9. *Кузнецов В.В.* // *УФН.* 1997. Т. 167. С. 1001.
10. *Das D.B., Nassehi V.* // *Water Sci. Technol.* 2002. V. 45(9). P. 301.
11. *Poirier J.P.* // *Phys. Earth Planet. Interiors.* 1994. V. 85. P. 319.
12. *Das D.B., Hanspal N.S., Nassehi V.* // *Hydrol. Proc.* 2005. V. 19. P. 2775.
13. *Бражкин В.В., Ляпин А.Г.* // *УФН.* 2000. Т. 170. С. 535.
14. *Smylie D. E.* // *Science.* 1999. V. 284. P. 461.
15. *Rutter M.D., Secco R.A., Uchida T. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1217.
16. *De Wijs G.A., Kresse G., Vocadlo L. et al.* // *Nature.* 1998. V. 392. P. 23.
17. *Terasaki H., Kato T., Urakawa S. et al.* // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 190. P. 93.
18. *Poirier J.P.* // *Geophys. J.* 1988. V. 92. P. 99.
19. *Каплан А.М.* // Особенности радиационных и механостимулированных процессов в неравновесных конденсированных системах. Дис. ... специальности ВАК 01.04.17. Ин-т хим. физ. РАН, 1996.
20. *Fearn D.R., Loper D.E., Roberts P.H.* // *Nature (London).* 1981. V. 292. P. 232.
21. *Worster M.G.* // *Ann. Rev. Fluid Mechanics.* 1997. V. 29. P. 91.
22. *Officer C.B.J.* // *Geophys.* 1986. V. 59. P. 89.
23. *Singh S.C., Naylor M.A.J., Montagner J.P.* // *Science.* 2000. V. 287. P. 2471.
24. *Anderson D.L.* // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2002. V. 99. P. 13966.
25. *Litvan G.G., Feldman R.F., Grattan-Bellew P.E.* // *Cem. Concr. Res.* 1982. V. 12. P. 649.
26. *Terasaki H., Kato T., Funakoshi K. et al.* // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2004. V. 16. P. 1707.
27. *Katann P.J., Ritzi R.W., Dominic D.F. et al.* // *Ground Water.* 2007. V. 45. P. 429.
28. *Koltermann C.E., Gorelick S.M.* // *Water Resour. Res.* 1995. V. 31. P. 3283.
29. *Doesburg J.C.* // *Sci. Technol. Rev.* 2007. December. P. 11.
30. *Riese D.O., Wegdam G.H.* // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. P. 1676.
31. *Волков Н.Б., Майер А.Е., Погорелко В.В. и др.* // *Вестн. Челябин. гос. ун-та. Физика.* 2010. Т. 24 (205). Вып. 8. С. 23.