

Глава 4*. Внутреннее устройство Земли.

В главе 4 изложена: модель горячей Земли, эволюция параметров Земли в контексте горячей модели, роль водорода, температура, давление и плотность вещества в центре Земли. Упругие свойства вещества внутреннего ядра. Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной. Упругие свойства кристаллической пылевой плазмы. Кристаллическая ячейка вещества внутреннего ядра Земли.

4. 1. Модель горячей Земли.

Модель внутреннего устройства Земли может быть верной и убедительной лишь в том случае, если:

- четко и ясно сформулированы условия и механизм образования планеты;
- оценены начальные параметры вещества планеты (температура, плотность, размер, химический состав и т.п.);
- эволюция параметров планеты очевидна и следует из основных законов физики, которые, естественно, не нарушаются;
- на определенном этапе эволюции, Земля должна оказаться именно такой, какая она есть сейчас.

Выполнение этих очевидных условий должно позволить:

- прогнозировать поведение Земли в будущем;
- найти и объяснить общность и различия Земли с другими планетами Солнечной системы.

Согласно (Магницкий, 1965), гравитационная энергия Земли равна:

$$E = 3/5 GM^2/R = 2.25 \times 10^{39} \text{ эрг}, \quad (4.1)$$

здесь: G - гравитационная постоянная, M - масса, а R - радиус Земли. Энергию такой величины необходимо затратить на то, чтобы «расташить» всю массу Земли по пылинкам так далеко друг от друга, чтобы они не смогли собраться вместе. Естественно, что именно столько выделится энергии, и пойдет на нагрев её вещества, если будет происходить обратный процесс – сжатие вещества Земли (за счет самогравитации). Если энергию E поделить на приемлемую величину теплоемкости вещества Земли ($c_p = 0.3$ кал/г·град.) и её массу, то оказывается, что температура земного вещества может достичь очень большого значения, порядка 30 000 К. Как следует из книги Магницкого (1965), *геофизики не знают, как можно воспользоваться этой оценкой. Температура в 30 000 К представляется им абсолютно нелепой* (там же). Очевидно, что при такой температуре вся Земля должна быть, по меньшей мере, расплавленной, что противоречило бы ее внутреннему устройству. Действительно, толщина мантии Земли составляет почти 3 тысячи километров. Время существования Земли (t) “всего” 4.5 млрд. лет ($t = 1.5 \times 10^{17}$ с). За это время (если бы вся Земля была расплавленной) земное вещество может кристаллизироваться на глубину (δ) не превышающую 400 - 600 км. [$\delta \approx (\zeta t)^{1/2}$, где ζ - температуропроводность земного вещества ($\approx 10^{-2}$ см²/с)]. Этот довод практически “закрыл” все дальнейшие попытки разработки модели “горячей” Земли. Для геофизиков остался лишь один путь - развитие “холодной” модели. В этом случае для “изготовления” Земли необходимо примерно 10^8 лет, именно для того, чтобы образующееся в этом процессе тепло успевало отводиться в космическое пространство радиационным способом, через излучение.

В этой главе мы рассмотрим “сценарий” образования горячей Земли, включающей быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. В этом случае температура вещества

Земли окажется порядка нескольких десятков тысяч градусов. Согласно этому "сценарию", температура вещества планеты (звезды, спутника) определяется только ее массой:

$$T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p. \quad (4.2)$$

Оцененная таким способом величина T , соответствует температуре вещества планеты в момент ее образования. Полагая, что в процессе эволюции планет и их спутников, они охлаждались, величина T приближается (оставаясь всегда больше) к температуре вещества (T_G) внутреннего ядра планеты ($T > T_G$).

Вещество, имеющее температуру $T = 30\,000\text{К}$ (≈ 3 эВ) будет находиться в газообразном состоянии, точнее, в состоянии слабоионизованного газа - плазмы. Земное вещество может нагреться до такой температуры при сжатии в момент образования планеты за счет протекания диссипативного процесса самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества в процессе его сжатия, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление станет равным давлению самогравитации (критерий Джинса). Воспользуемся этим критерием для оценки термодинамических параметров вещества Земли. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии, близком к идеальному газу, находится во внутреннем ядре. Это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является физически непротиворечивым следствием этого предположения...

Воспользуемся им для оценки современных термодинамических параметров вещества внутреннего ядра. Приравняем скорость звука в идеальном газе: $(\gamma R_g T / \mu)^{1/2}$ к величине скорости Р-волн внутреннего G-ядра ($v_p = 11.2$ км/с), получаем: $T/\mu \approx 1$, (T в 10^4 К). Здесь: $\gamma = c_p/c_v$ - показатель адиабаты, R_g - газовая постоянная, μ - молекулярный (атомный) вес вещества.

Оценим величину T/μ из равенства: $nkT = \rho g R = 3.5 \cdot 10^{12}$ дин/см² (давление в центре Земли), где $n = \rho_G/\mu m$ - концентрация вещества, ρ_G - плотность вещества G-ядра, m - вес протона, k - постоянная Больцмана, ρ - средняя плотность Земли, g - сила тяжести, R - ее современный радиус, а получаемая величина $T/\mu \approx 1/3$. Эта оценка, на наш взгляд, более правдоподобна, чем первая. Принимая величину $T = 30\,000$ К, получаем $\mu \approx 10$. Заметим, что в этом случае величина молекулярного (атомного) веса вещества Земли показывает, что в ее составе значительное место принадлежит водороду. В качестве примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и железа. Молекулярный вес μ "молекулы", составленной из атомов железа и водорода, будет равен примерно 10 при условии, если один атом железа будет "окружен" пятью атомами водорода и т.п.

Согласно нашей модели, температура $T = 30\,000$ К (или близкая к ней) присуща только веществу внутреннего ядра. Большая часть вещества Земли (внешнее ядро и мантия) за время ее эволюции уже остыла (релаксировала). Это один из главных постулатов нашей модели. Другой, не менее важный, говорит о том, что вещество, нагретое до такой температуры, будет находиться в газообразном состоянии и может быть сжато до плотности, большей, чем у металла. Отсюда следует, что начальный размер Земли, в момент ее создания, был меньше современного ($R_0 < R$). Оценки начального радиуса Земли R_0 , проведенные различными способами, не слишком надежны, хотя все они показывают, что $R_0 < R$ современного. Величина R_0 , по различным оценкам, колеблется в диапазоне 3 - 4 тыс. километров. Наиболее интересное решение нашей задачи возникает в том случае, если принять R_0 равным 3.5 тыс. км. В пользу него, приведем такое, весьма интересное наблюдение. Радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 тыс. км. Площадь поверхности внешнего ядра с удивительной точностью равна суммарной площади материков, а сами материки с удивительной точностью

“совмещаются” друг с другом на шаре с радиусом, равным радиусу внешнего ядра (см. рис. 1-9, глава 1). Эти обстоятельства, по-видимому, можно истолковать в пользу того, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю её поверхность.

Поделив массу Земли на объем внешнего ядра, можно получить оценку начальной плотности вещества Земли (ρ_0), которая могла достигать **35 г/см³**. Начальная температура вещества T_0 оказывается примерно вдвое больше, чем оцененная нами величина T . Давление в центре Земли должно быть больше современного примерно в 15 раз. Молекулярный (атомный) вес, по всей видимости, был меньше современного: $\mu_0 < 10$. В течение последующих 4.5 млрд. лет Земля, после образования, эволюционировала, при этом, естественно, изменялись значения величин ее основных параметров: радиус, температура в центре и на поверхности, плотность и химический состав вещества внутреннего ядра, величина теплового потока, гравитационное и магнитное поля и т.д.

Возникает естественный вопрос, насколько реальна оценка такой величины плотности как 35 г/см³? До недавнего времени ответа на этот вопрос не было. Однако совсем недавно спутник CoRoT нашёл сразу несколько внесолнечных планет и загадочный тёмный объект неизвестной природы. Масса одного из них в 50 раз меньше, чем у Солнца, а плотность в 4 раза больше, чем у свинца. Объект, который получил название CoRoT-Ехо-3b, обращается вокруг слабой звездочки 13-й звёздной величины, идентифицируемой в эксперименте как CoRoT-Ехо-3. Средняя плотность CoRoT-Ехо-3b составляет **около 45 г/см³**. Плотность других планет из этой системы несколько меньше, но всё равно очень велика (Deleuil et al. 2011). *Этот результат объяснения не находит.*

4. 2. Эволюция параметров Земли в контексте горячей модели.

К настоящему времени геологами собраны коллекции образцов, обработка которых показывает, что на Земле раньше было совсем не так как сейчас. Были другими состав и плотность атмосферы, другая температура поверхности, другие океаны, другая скорость вращения Земли, другое гравитационное и магнитное поля и т.д. Практически все они, в той или иной степени, находятся в противоречии с моделью холодной Земли, построенной на принципе актуализма: «так было всегда». Ниже мы обратимся к известным фактам из истории эволюции Земли в контексте нашей модели.

Радиус Земли. Согласно нашей модели, эволюция Земли состоит в релаксации метастабильного плотного горячего вещества к стабильному состоянию путем реализации двух экзотермических фазовых переходов: конденсации и последующей кристаллизации. Процесс конденсации начинается на границе внешнего ядра (внутреннее – ещё не сформировалось), процесс кристаллизации – там же, но фронты обеих фазовых переходов имеют противоположные направления. Эти процессы сопровождается перемещением масс вдоль по радиусу (рис. 4-1-а). При этом происходит превращение однородной модели Земли в многослойную. Конденсация приводит к тому, что плотность исходного вещества становится меньше на величину $\Delta\rho \approx \rho_0 - \rho_{\text{я}}$, где ρ_0 – исходная плотность вещества Земли (35 г/см³), а $\rho_{\text{я}}$ – плотность вещества ядра (≈ 10 г/см³). По нашей модели вещество с плотностью $\Delta\rho$ после кристаллизации его на границе фазового перехода формирует мантию. Эти фазовые переходы сопровождаются ответным перемещением масс в обратную сторону, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса (см. рис. 6). Таким образом, масса мантии равна массе «потерянной» внешним ядром: $(R_3^3 - R_{\text{я}}^3)\rho_{\text{м}} \approx R_{\text{я}}^3\Delta\rho$. Здесь R_3 и $R_{\text{я}}$ – радиусы современной Земли и внешнего ядра, отсюда $\Delta\rho \approx \rho_{\text{м}} (R_3^3 - R_{\text{я}}^3) / R_{\text{я}}^3 \approx 25$ г/см³, что и следует из модели. В нашей модели гравитирующий шар (звезда, планета, большой спутник) рассматривается как саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов.

Итак, после образования, горячая Земля охлаждалась. На первом этапе остыла и кристаллизовалась ее внешняя оболочка - прообраз земной материковой, гранитной коры. Вещество протоЗемли, находящееся после образования в газообразном (плазменном) состоянии, конденсировалось, образуя вещество внешнего ядра, и затем кристаллизовалось, - образуя мантию. Таким образом, в эволюции планеты непосредственное участие принимали два экзотермических фазовых перехода: конденсация и кристаллизация. На самом раннем этапе эволюции Земли скорость охлаждения её вещества определял процесс кристаллизации. Этот процесс контролировался кондуктивным теплопереносом – температуропроводностью: $\zeta = \lambda / \rho c_p$, где ρ - плотность, а λ - коэффициент теплопроводности. Для обычных веществ величина $\zeta = 0.1 - 0.01$ (см²/с). Поначалу, наращивание мантии происходило очень медленно: $l \sim (\zeta t)^{1/2}$, t - время эволюции. Увеличение толщины мантии сопровождалось уменьшением внутреннего ядра. Так продолжалось до тех пор, пока ее толщина жидкого внешнего ядра l не стала достаточной для того, чтобы во внешнем ядре и в мантии возникла конвекция ($l \geq l^*$) и “заработал” конвективный теплоперенос, более эффективный, чем кондуктивный. Известно, что конвекция в слое толщиной l между двумя плоскостями, поддерживаемыми при постоянном перепаде температуры ΔT , возникает при числе Релея $Ra > 1710$:

$$Ra = (g \beta l^3 \Delta T) / (\eta \zeta). \quad (4.3)$$

Подстановка характерных для вещества мантии Земли величин ускорения силы тяжести g , коэффициента объемного расширения β , кинематической вязкости η , и коэффициента температуропроводности ζ , для $\Delta T = 10^4$ К, определяет величину $l^* \approx 300$ км. По оценкам, толщина внешнего ядра была примерно того же порядка.

В работе (Chandrasekhar, 1961) показано, что для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в ядре и мантии) произведение чисел Рейнольдса:

$Re = (v_k l) / \eta$ и Прандтля $Pr = \eta / \zeta$ пропорционально корню квадратному из числа Релея:

$$Re \times Pr \sim Ra^{1/2}. \quad (4.4)$$

В свою очередь, число Релея (18.3) $Ra \sim l^3$. Подставляя, получаем зависимость между характерным размером l , скоростью конвекции в мантии v_k ($v_k = l/t$) и характерным временем процесса t : $v_k l \sim l^{3/2}$, или: $l^2/t \sim l^{3/2}$. Заменяя l на ΔR , получаем зависимость: $\Delta R \sim t^2$, вместо $\Delta R \sim (t)^{1/2}$ в начале процесса эволюции Земли (см. вставку в левом верхнем углу рис. 4-1-а).

Таким образом, по нашей модели получается, что в течение примерно 3.5 - 4 млрд. лет толщина мантии увеличилась от нуля до (примерно) 300 км (l^*), а за последние 0.5 - 1 млрд. лет - более чем на 2.5 тыс. км. Наша модель горячей Земли оказывается адекватной модели расширяющейся Земли, которую разрабатывали в свое время С. Кэри (Carey, 1976); Хильденберг (Hilgenberg, 1933); Оуэн (Owen, 1992) и др. Рисунок 4-1 демонстрирует зависимость земного радиуса от времени эволюции, согласно моделям этих авторов и, для сравнения, нашу модель, в которой $\Delta R \sim t^2$. Так как радиус Земли однозначно связан с силой тяжести и средней плотностью, на рисунке показано изменение этих параметров. Согласно модели, увеличение радиуса Земли происходит за счет роста толщины мантии, поэтому на рисунке показано как происходило увеличение массы мантии, а так как количество воды в океанах жестко связано с массой мантии, то этот график характеризует и скорость «наполнения» океанов. Здесь же, для сравнения, приведен ориентировочный ход увеличения воды в акватории Мирового океана по наблюдательным данным.

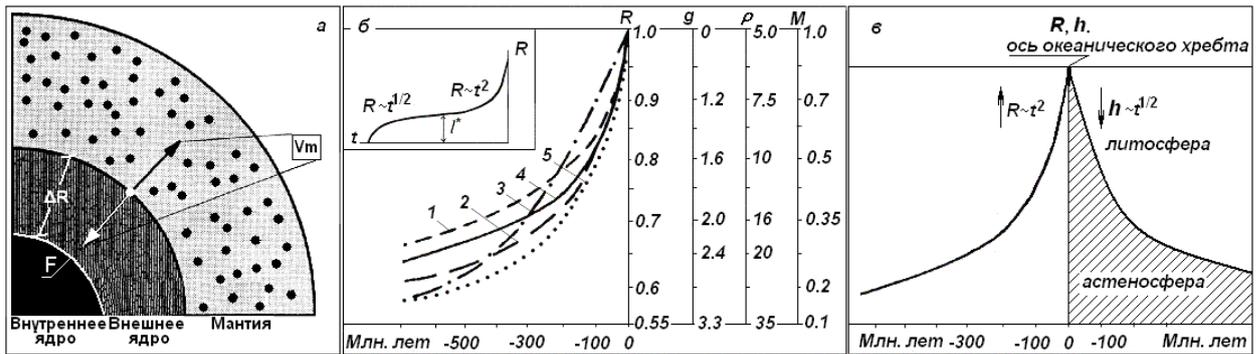


Рис. 4-1. (а) Перенос массы: положительной (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и “отрицательной” (внутри), - при формировании внешнего ядра, при выполнении условия соблюдения постоянства момента импульса. (б) Изменение радиуса Земли R от времени её эволюции: - в течение всего периода эволюции t , и за 500 млн. лет. Здесь $R(t)$, $g(t)$, $\rho(t)$: 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна, 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов $M(t)$ – 5. (в) Толщина литосферы $h \sim t^{1/2}$ в зоне СОХ.

Сравним полученную зависимость $\Delta R \sim t^2$ (или $R \sim t^2$, где R - радиус Земли) с хорошо известным в тектонике плит характером глубины астеносферы в зоне спрединга от расстояния от центра срединно-океанического хребта, оцененного в годах: $h \sim t^{1/2}$, (h – глубина астеносферы, а t – время, отсчитанное назад от современного). Эти функции являются однозначно обратными и симметричными относительно: $\Delta R \sim t_R$, или $h \sim t_h$ (что одно и то же). Действительно, $\Delta R = -h$, а $t_R = -t_h$. Используя наши оценки, полученные для зависимости ($\Delta R \sim t^2$), и подставив h в км, а t в млн. лет, получим ориентировочно: $h \approx 100 \times t^{1/2}$, для $t < 500$ млн. лет. Таким образом, известная зависимость (рис. 1-6), показывающая изменение толщины астеносферной зоны от времени эволюции, является (в нашей модели) ни чем иным, как скоростью расширения Земли.

Расширение Земли определяется тем обстоятельством, что силы растяжения, возникающие при разуплотнении сжатого газообразного вещества, и переходе его в нормальное, конденсированное состояние, превалируют над силами гравитации – силами сжатия. В принципе, по модели, после окончания цикла расширения, наступает цикл сжатия, когда гравитация оказывается сильнее, чем расширение. Есть все основания говорить о том, что наша модель описывает расширяющуюся, пульсирующую Землю. Подобная гипотеза неоднократно высказывалась и обсуждалась известными геологами: В.А. Обручевым, М.А.Усовым, М.М. Тетяевым, Е.Е. Милановским и др. Естественно, геологами не обсуждалась физика подобной модели эволюции Земли.

Планеты. Согласно нашей модели все планеты земной группы и Луна прошли такой путь эволюции. Отличие состоит только в том, что чем меньше масса планеты, тем быстрее происходит эволюция (рис. 4-2) и меньше начальная плотность вещества планеты (рис. 9-5). Меркурий «выбивается» из этого ряда. Возможной причиной может быть близость его к Солнцу и дополнительный разогрев недр за счет приливного трения. Время окончания эволюции Луны определено по прекращению генерации геомагнитного поля. Период эволюции Марса и Венеры, так же «потерявших» дипольное поле, определен качественно, по пересечению линии, соединяющей Землю и Луну. Время окончания эволюции Земли оценивается делением количества метастабильного вещества G-ядра на скорость роста радиуса. Такая ориентировочная оценка показывает, что при средней скорости роста радиуса ≈ 1 см/год, его приращение $\Delta R \approx 4R_G^3 \Delta\rho/S\rho_M = (2-3) \cdot 10^6$ см, или оставшееся время эволюции $\approx 2-3$ млн. лет, т.е. фактически можно считать полное время эволюции

Земли ≈ 4.5 млрд. лет. Здесь, $\Delta\rho$ - разность плотностей между G- и E ядрами, $S\rho_M$ - площадь поверхности Земли и плотность вещества верхней мантии.

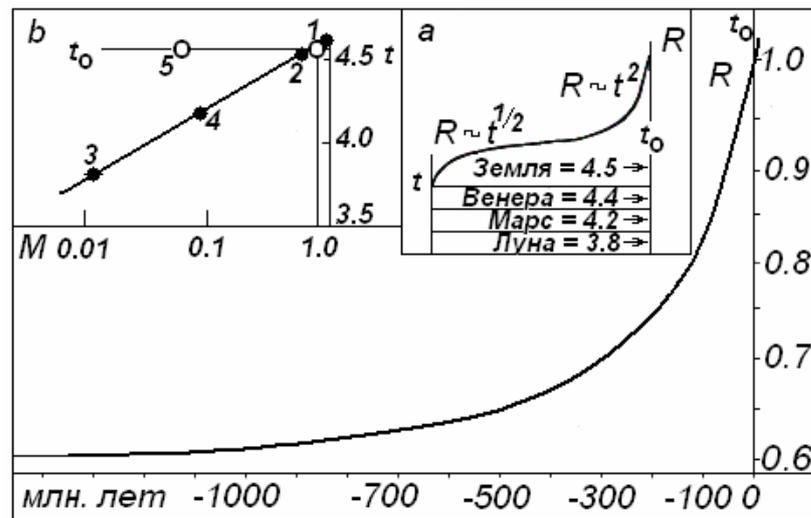


Рис. 4-2. Изменение радиуса планеты в период эволюции от начала до её окончания (a). Зависимость времени эволюции от массы планет и Луны (b). Здесь 1- Земля, 2 - Венера, 3 - Луна, 4 - Марс, 5 - Меркурий.

Любая теория может претендовать на признание лишь в том случае, если она способна давать прогноз предстоящих событий. Суть модели горячей Земли состоит в постепенной релаксации возникшего в момент образования планеты вещества в состоянии перегретого и пересжатого пара. Вещество Земли проходит стадии конденсации пара и последующей его кристаллизации. Эти процессы относятся к экзотермическим фазовым переходам первого рода. Они происходят при выделении теплоты фазового перехода. При перегреве вещества за счет выделяемой энергии возможны обратные переходы испарения и плавления. Они происходят при поглощении энергии и относятся - к эндотермическим. При экзотермических переходах вещество - разуплотняется, что приводит к расширению Земли, при эндотермических, наоборот, - вещество Земли становится более плотным - Земля сжимается. В истории Земли эти моменты можно проследить по чередованию полярностей геомагнитного поля.

Прогноз. Как будет показано в главе 14, генерация геомагнитного поля обуславливается фазовым переходом на границе внутреннего ядра. По нашей модели это означает, что в периоды современной полярности Земля сжималась, противоположной - расширялась.

Как следует из рисунков 4-1 и 4-2, несмотря на общий характер зависимости: $\Delta R \sim t^2$, на последнем участке можно принять $\Delta R \sim t$. В течение последних 5 млн. лет, ΔR увеличился примерно на 50 км (рис. 4-3). Средняя скорость расширения Земли ≈ 1 см/год. На рис. 4-2 показано, что радиус Земли ещё будет возрастать, но насколько?

Оценим предельную величину радиуса Земли. Как следует из нашей модели, расширение Земли, прекратится после того, как вещество внутреннего ядра релаксирует и конденсируется. Внутреннее ядро - исчезнет, прекратится генерация геомагнитного поля. Величину ΔR , на которую возрастет радиус Земли, мы оценили выше из баланса массы: «излишек» массы внутреннего ядра $4\pi/3R_G^3\Delta\rho = \Delta R S\rho$, где $\Delta\rho \approx \rho$, $\Delta\rho$ - «излишек» плотности, ρ - средняя плотность вещества Земли, а S - площадь поверхности Земли. Величина ΔR - оказывается порядка 20 - 30 км. Отсюда следует неутешительная для землян оценка: **оставшееся время существования жизни на Земле $\approx 2 - 3$ млн. лет.** В течение этого времени на Земле произойдет одна - две инверсии геомагнитного поля и несколько экскурсов. Сила тяжести при этом уменьшится примерно на 10 Гал ($g = GM/R^2$).

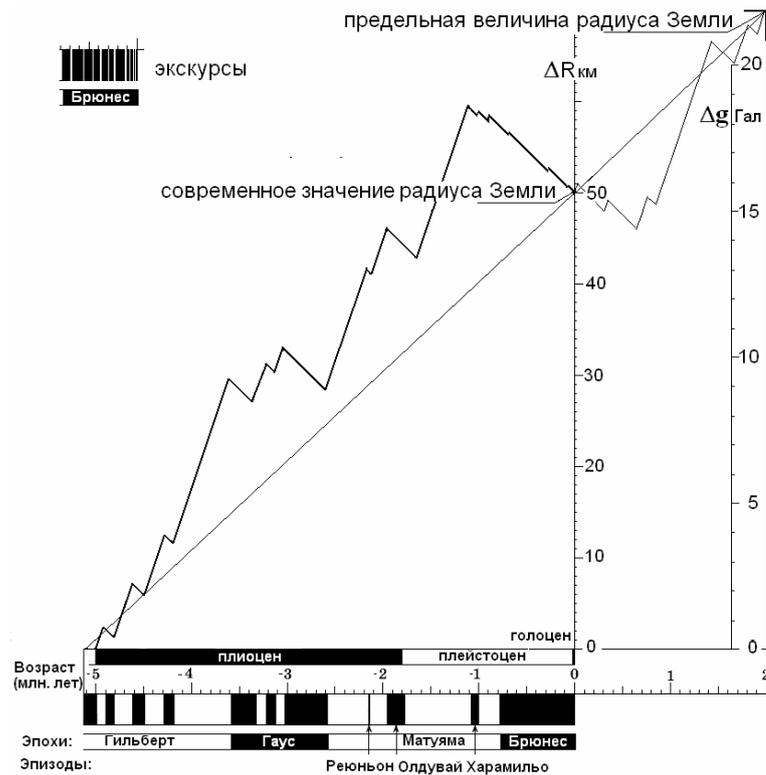


Рис. 4-3. Возможный (следующий из горячей модели) ход изменения радиуса Земли.

4. 3. Роль водорода.

Авторы многих работ по физике и химии Земли обращаются к факту присутствия водорода в ее недрах. В значительной части, это экспериментальные наблюдения за эманиацией водорода при извержении вулканов, землетрясениях, в зонах глубинных разломов и т.п. Кроме этого, наличие в глубинах Земли водорода, в некоторых ее теоретических моделях, способствует объяснению ряда свойств вещества (например, величину электропроводности астеносферы (Karato, 1990)). Складывается впечатление, что наличие водорода в земных глубинах можно считать твердо установленным фактом. В этой связи возникает естественный вопрос: откуда в недрах Земли берется водород? Согласно общепринятой модели “холодной” Земли, в момент ее образования, когда она “собиралась” из отдельных кусочков железа и силикатов, не находится места летучему водороду. В то же время, например, по данным об атмосфере Земли на ее ранних этапах развития, состав земной атмосферы был преимущественно водородным (Салоп, 1982). Этот факт противоречит модели холодной Земли.

Совсем другое “отношение” к водороду в модели “горячей” Земли. По нашей модели, Земля образовалась вместе с Солнцем и другими планетами и их спутниками в едином процессе и из одного и того же “строительного материала”, в основном, - водорода. Вещество Земли в процессе ее образования отделилось из общей массы протосолнечного диска, было сжато и нагрето до температуры порядка нескольких тысяч градусов при самогравитации. Процесс самосжатия (коллапс) уравнивался растущей величиной внутреннего газокINETического давления. В тот момент, когда газокINETическое давление и давление самогравитации уравнились, самосжатие вещества Земли прекратилось. Земля стала остывать, формируя при этом земную кору, внешнее ядро (при конденсации первично газообразного плотного вещества, которое

сохранилось до наших дней как внутреннее ядро), и мантию (при кристаллизации вещества внешнего ядра). Вещество внутреннего ядра, согласно нашей модели, представляет собой перегретый плотный газ (слабоионизированную плазму), состоящий в значительной степени из водорода.

Модель горячей Земли предполагает наличие водорода как во внутреннем ядре, так и в других ее оболочках (естественно, в значительно меньших концентрациях). Воспользуемся введенным в работе (Karato, 1990) параметром, характеризующим отношение концентраций “водород/кремний” (H/Si). Этот параметр во внутреннем ядре (по нашей модели) примерно равен единице (точнее, 0,66). Согласно Карато, на глубине 100 км величина H/Si порядка 10^{-3} - 10^{-4} . Весьма грубые оценки показывают, что на границе ядро-мантия H/Si будет около 0, 2 - 0,3 и т.д.

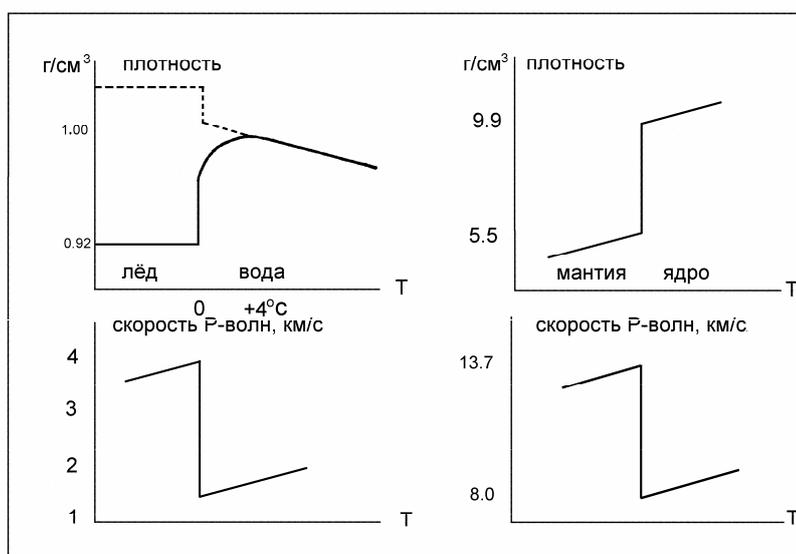


Рис. 4-4. Изменение плотности и скорости звука на границе лед-вода - слева; и мантия-ядро - справа.

Присутствие водорода в веществе земных оболочек позволяет воспользоваться его удивительной и уникальной способностью образовывать т.н. водородные связи между элементами (атомами, молекулами, ионами и т.п.) вещества. Как будет следовать из дальнейшего изложения, этот подход позволяет найти объяснение свойств и структуры земного вещества альтернативное общепринятой точке зрения.

Вода и лед с их водородными связями обладают уникальными аномальными свойствами. Свойства системы “вода-лед” (резкое изменение плотности и скорости звука на границе жидкость-кристалл) в значительной мере похожи на свойства системы “ядро-мантия” (см. рис. 4-4). Это обстоятельство позволяет нам использовать теории и модели, разработанные для воды, - для объяснения свойств и структуры вещества земных оболочек. Однако прежде чем перейти к построению нашей модели, приведем некоторые сведения о свойствах воды, льда и водородных связей.

Вода, лед и водородные связи. Вода и лед, это самое распространенное вещество во Вселенной, и в то же время, это самое необычное вещество, обладающее самыми “аномальными” (по сравнению с другими “нормальными” веществами) свойствами. Аномальные свойства воды настолько привычны, что о них обычно не задумываются. Еще Галилей заметил, что жизнь на Земле обязана проявлению водой ее аномальных свойств. Физические и химические свойства воды и льда обсуждаются в научной литературе не менее 200 лет. Аномальное поведение воды обязано, как известно, наличию

у нее водородных связей. Вещества, так же обладающие водородными связями, ведут себя аналогично воде. Водородная связь это особый тип связи между атомами. Промежуточный - между валентной, и Ван дер-Ваальсовой связями. Эта связь может образоваться при наличии атома Н между двумя электроотрицательными атомами, причем с одним из них атом Н связан ковалентной связью. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния: О - О, О - N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица 4.1. (ФЭ, 1992).

Таблица 4.1.

Н - связь	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы 4.1 следует, что наличие (сильной) водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

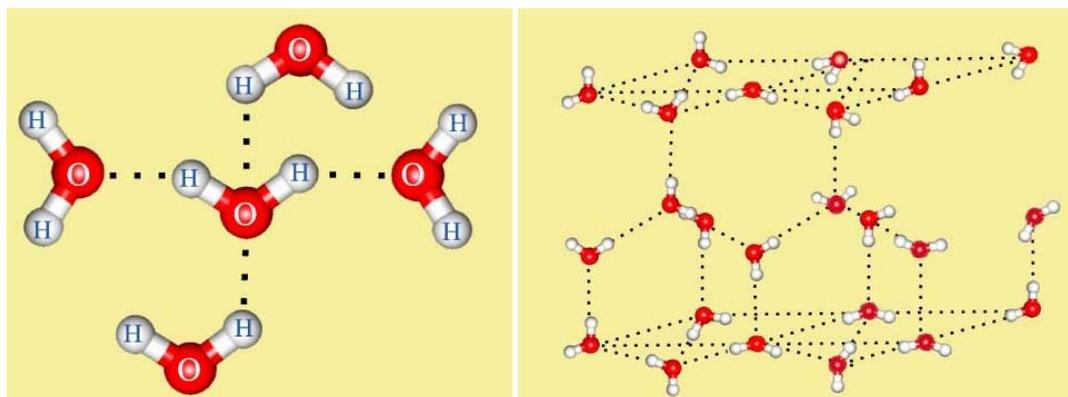


Рис. 4-5. Водородные связи (точки, слева) и структура льда (справа).

Плотность льда меньше плотности воды. Это свойство отличает воду и другие вещества, обладающие водородными связями, от прочих, у которых плотность вещества в твердом кристаллическом состоянии всегда выше, чем плотность его расплава. При переходе жидкости в твердое состояние, молекулы большинства веществ в обычном состоянии располагаются теснее, а само вещество становится плотнее. Однако, это совсем не так у воды. Охлаждая воду, можно наблюдать за поведением ее плотности (см. рис. 4-4). В начале плотность ведет себя обычным образом: вода при охлаждении становится все плотнее и плотнее. После охлаждения ее до температуры 4 °С она, вопреки общим представлениям, становится легче, а замерзая и образуя лед, еще легче.

Вода представляет собой гидрид кислорода. Сравним ее свойства со свойствами гидридов элементов, входящих так же как кислород в шестую группу таблицы Менделеева. Данные по температурам плавления и кипения этих гидридов приведены в таблице 4.2. В четвертой строке таблицы указаны примерные величины температур плавления и кипения воды, если бы она была обычным гидридом, и не обладала бы водородными связями. Оценка получена в предположении об обратной зависимости температур плавления и кипения от величины молекулярного веса. Эта зависимость достаточно четко прослеживается для гидридов первых трех столбцов таблицы. Из таблиц

4.1 и 4.2 видно, насколько наличие водородных связей меняет не только плотность упаковки вещества, но и его термодинамические характеристики: Наличие водородных связей в веществе, в нашем случае в воде, приводит к повышению его температуры плавления примерно на 95, а температуры кипения, на 170 градусов. Если бы вода не обладала способностью к образованию водородных связей, то в нормальных условиях она находилась бы только в газообразном состоянии и превращалась в жидкость при температуре порядка -70°C .

Таблица 4.2.

	Гидриды:	T плав. ($^{\circ}\text{C}$)	T кип. ($^{\circ}\text{C}$)	Молек. вес:
1	H_2Te	- 60	- 5	129.6
2	H_2Se	- 65	- 40	81
3	H_2S	- 85	- 60	34
4	H_2O	- 95	- 70	18
5	H_2O	0	100	18

Природа аномального поведения воды была предметом исследований более 200 лет тому назад Генри Кавендиша и Антуана Лавуазье. Они заложили основы современного понимания природы воды. В 1910 г. физики, американец П. Бриджмен и немец Г. Тамман, обнаружили, что лед может образовывать несколько полиморфных кристаллических модификаций. Понятие о водородных связях было впервые введено в 1920 г. американскими учеными У. Латимером и У. Родебушем. С этих пор водородные связи являются предметом фундаментальных исследований. Английский ученый Уильям Брэгг, разработавший рентгеноструктурный метод анализа кристаллов, обнаружил, что каждая молекула H_2O во льду окружена четырьмя другими молекулами. В 1932 году ученик Брэгга проф. Д. Бернал совместно с Р. Фаулером (Бернал, Фаулер, 1934) разработали теорию молекулярной структуры воды, основанную на интерпретации рентгенографических данных льда. В основе их теории были положены представления о воде как о трехмерной структуре с четверной координацией.

Рентгенографические исследования льда показывают, что ядра кислорода располагаются в нем так же, как атомы кремния в решетке тридимита. Структура жидкой воды, согласно Берналу и Фаулеру, напоминает структуру кварца. При этом каждая молекула H_2O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами. Тридимит и кварц, это два различных кристаллических состояния кремнезема SiO_2 . Химический состав и молекулярные структуры их одинаковы, а плотность кварца выше примерно на 10 %. Это различие обусловлено тем, что, имея одинаковые расстояния между атомами и ближайшими молекулами (т.е. первые координационные сферы), у кварца и тридимита различаются вторые координационные сферы: 4.2 \AA - у кварца и 4.5 \AA - тридимита. В последствии выяснилось, что эта аналогия не более чем образное представление воды и льда, т.к. кварцеподобных структур в жидкой воде обнаружить не удалось.

Стоит упомянуть идеи Л. Полинга, высказавшего в 1952 году предположение, что структура воды подобна структуре клатратных гидратов. Полинг предполагал, что у льда и воды, находящейся при различной температуре, количество водородных связей весьма различается. По его данным при 0°C около 15 % водородных связей оказываются разорванными. По характеру зависимости диэлектрических свойств воды от температуры, удалось выяснить, что при 25°C в жидкой воде 67 % всех молекул H_2O сохраняют все четыре водородные связи, 23 % - три водородные связи, 7,6 % - две связи и лишь 0,2 % полностью свободные молекулы. Английский физик Д.Ж. Попл предположил, что водородные связи вообще не рвутся, а всего лишь “изгибаются”. Перестройка структуры воды, по Поплу, происходит именно благодаря “изгибанию” водородных связей. Холл предложил рассматривать воду как ассоциат, состоящий из двух структур: обычной и плотноупакованной. Упомянем еще одно, весьма важное свойство водородных связей.

Оно называется кооперативностью и означает, что образование одной водородной связи способствует возникновению рядом следующих связей. Идея кооперативности основывается на том, что для образования системы водородных связей требуется меньше энергии, чем арифметическое сложение энергий отдельных связей.

Водородные связи в минералах. Красивая идея о возможности объяснения такого факта, что плотность жидкого ядра выше, чем плотность вещества мантии, может быть связана не с тем, что ядро железное, а мантия – силикатная, будет воспринята лишь при доказательстве того факта, что в мантии действительно существуют минералы, в составе которых водородные связи имеются.

Геологи считают водород самым трудноуловимым элементом в составе Земли. Современная наука не в состоянии пока подсчитать, сколько водорода содержится в гидратированной океанической коре и в верхней литосферной мантии, в переходной зоне (на глубинах 410–660 км) и в нижней мантии, не говоря уже о земном ядре: разброс в различных оценках общего количества водорода внутри Земли достигает одного порядка.

Немногом больше ясности существует и в вопросе о происхождении водорода, а, следовательно, и воды на нашей планете. То ли оно было эндогенным, то есть накопление водорода происходило непосредственно в процессе первичного сбора протопланетного вещества в Солнечной системе, то ли экзогенным, то есть водород был принесен позднее из околоземного пространства различными богатыми водородом кометами. Всё это остается не ясным.

Соответственно, согласно одной широко распространенной точке зрения, вода на Земле образовалась конденсационным путем из атмосферы вскоре после образования планеты, около 4,5 млрд. лет тому назад, сторонники же альтернативного подхода настаивают на том, что вода длительное время равномерно накапливалась на поверхности в процессе дегазации и вулканизма мантии Земли.

В середине 80-х годов XX века Джозефу Смайту, работающему в Университете Колорадо (Боулдер), впервые удалось обнаружить, что в структуре одного из наиболее распространенных минералов земной верхней мантии, вадслеита, присутствуют атомы водорода, то есть эти минералы имеют в своем составе водную (гидроксильную) группу (ОН). Позднее, в 1996 году, Смайту также удалось открыть новую водосодержащую разновидность вадслеита, вадслеит II, который не разлагается даже в глубине мантии.

За последние десять-пятнадцать лет методом инфракрасной спектроскопии было установлено присутствие низких содержаний H_2O и в ряде других так называемых номинально безводных минералов земной мантии (оливине, пироксене, гранате). Причем, поскольку оливин и его более плотные полиморфы - вадслеит и рингвудит - являются основными минералами мантии, - это позволяет рассматривать их в качестве своеобразного гигантского водного резервуара (так, вадслеит может содержать до 3% воды, рингвудит — до 2,8%).

В современной минералогии минералы-гидроксиды, обладающие гидроксильно-водородными связями, например, такие как диаспор ($AlO(OH)$) и гётит ($FeO(OH)$), для того, чтобы подчеркнуть их особенность, даже записываются специальным образом: $HAIO_2$, $HFeO_2$. (Буллах и др., 2008).

Аномалии свойств, обусловленные наличием водородной связи. Наличием водородных связей обусловлены уникальные свойства многих веществ, в том числе воды. Сильные водородные связи между молекулами воды *препятствуют ее плавлению и испарению*.

Водородные связи являются причиной и другого уникального свойства воды - при плавлении ее плотность возрастает. В структуре льда каждый атом кислорода связан через атомы водорода с четырьмя другими атомами кислорода - из других молекул воды. В результате образуется очень рыхлая "ажурная" структура. Вот почему лед такой легкий.

При плавлении льда около 10% водородных связей разрушается, и молекулы воды немного сближаются. Поэтому плотность жидкой воды при температуре плавления выше,

чем плотность льда. Дальнейшее нагревание, с одной стороны, должно вызывать увеличение объема воды. Это происходит со всеми веществами.

С другой стороны, водородные связи продолжают разрушаться, а это должно приводить к уменьшению объема воды. В результате плотность воды изменяется неравномерно. Наибольшее значение (1,00 г/мл) она имеет при температуре 4 °С. Такова зимняя температура вблизи дна пресноводных водоемов, где скапливается вода с максимальной плотностью.

http://www.hge.pu.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=295&Itemid=5

Вывод: согласно модели горячей Земли образование мантии обязано продувке водородом вещества кристаллизующегося на поверхности жидкого ядра.

4. 4. Температура, давление и плотность вещества в центре Земли.

Задача определения термодинамических параметров горячей Земли не допускает широкого разнообразия вариантов. Полагая, что масса Земли в процессе ее эволюции практически не меняется, температура определяется достаточно строго, а внутреннее давление является функцией радиуса Земли и температуры ее вещества, остальные параметры оцениваются более или менее однозначно. Согласно нашей модели, как отмечалось, начальный радиус Земли был примерно в два раза меньше современного. Следовательно, Земля расширялась, и ее объем в течение эволюции увеличился примерно в 8 раз. Начальная величина плотности вещества Земли составляла примерно 35 г/см³, что в три раза больше современной величины плотности вещества внутреннего ядра ρ_G .

Давление. Величина современного давления в центре Земли оценивается как $p = \rho g R = 3.5 \cdot 10^{12}$ дин/см². Давление в центре Земли в момент ее образования (по нашей модели) $p_0 = \rho_0 g_0 R_0$ должно было быть примерно в 10-15 раз выше, чем современное. Воспользуемся оценкой Ландау (Ландау, Лифшиц; 1964) для величины давления вещества, находящегося в сверхсжатом состоянии, $p \sim \rho^{5/3}$ (примерно: $p \sim \rho^2$). Отсюда следует, что величина плотности внутреннего ядра должна уменьшаться в течение эволюции Земли, по мере уменьшения давления, и достигнуть к настоящему времени общепринятых для величины плотности вещества внутреннего ядра значений. Так как начальный радиус Земли оказался примерно вдвое меньше современного, то гравитационная энергия только что образованной Земли должна быть примерно вдвое больше (а величина $g_0 \approx 3.5 g$), чем оцененная нами. Вряд ли начальная температура вещества Земли T_0 могла быть в два раза больше чем оцененная нами выше (30 000 К). Дело в том, что величина теплоемкости c_p возрастает с увеличением температуры, а $T \sim 1/c_p$. Этот факт приведет к некоторому снижению величины T_0 .

Температура. Тем не менее, если принять $T_0 \approx 2T$ и учесть зависимость ρ от p ($p \sim \rho^2$), то можно оценить величину μ_0 . Так как $T/\mu \sim p/\rho \sim (p)^{1/2}$, то $T_0/\mu_0 \approx 1$, а величина $\mu_0 \approx 5$, что находится в согласии с нашей моделью: вещество Земли на начальном этапе эволюции было более “солнечным”: на один атом железа здесь необходимо уже 10 атомов водорода, а не 5, как сейчас. Можно выяснить такой вопрос: сколько водорода (M_H) должна была “потерять” Земля за время своей эволюции для того, чтобы величина μ уменьшилась вдвое. Будем полагать, что μ^* современной Земли: $\mu^* \approx 50$ (не путать с μ внутреннего ядра). Массу Земли можно представить: $M = Nm\mu^*$, где N - полное число атомов (молекул). Массу потерянного Землей водорода, аналогично: $M_H = 10Nm\mu_H$, где $\mu_H = 1$ - атомный вес водорода, а 10 - число атомов водорода на один атом железа. Отсюда: $M_H/M \approx 1/5$, или, иначе, потери водорода составляют не более 20% от начальной массы Земли M_0 , что, при наших точностях оценок, не должно особенно сказаться.

Тепловой поток. Градиенты температуры и давления dT/dR и dp/dR , согласно нашей модели, были, в прошлом, заметно выше (первый примерно в 3-4 раза выше, а второй - в 15-20 раз). Следовательно, тепловой поток Q ($Q \sim dT/dR$) на начальном этапе эволюции

Земли тоже был выше современного. Кстати, по нашей модели, можно оценить величину теплового потока. Воспользуемся для этого известной термодинамической формулой, связывающей энергию и энтропию системы: $dE = T dS - p dV$. Положим, что температура T изменяется в области фазового перехода на 10 000 К, а изменение энтропии dS порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина $T \cdot dS \approx U$, где U - теплота фазового перехода - конденсации, $U = (10-15)$ кДж/г. Величина теплового потока в этом случае:

$$Q = T \cdot dS \cdot M/t_0, \quad (4.5)$$

где t_0 - время эволюции Земли ($t_0 = 4.5 \cdot 10^9$ лет), оказывается равной $Q = 10^{29}$ эрг/год, что примерно на порядок больше современного значения величины Q . Учитывая то, что раньше тепловой поток был больше современного, эта оценка не должна вызывать особых сомнений.

К этому следует добавить, что тепловой поток на Луне, где, по нашей модели, конденсация первичного вещества уже закончилась, а кристаллизация ещё идет, примерно в 30 меньше, чем тепловой поток Земли. Теплота фазового перехода конденсации примерно в 30 раз больше, чем теплота кристаллизации, что подтверждает нашу модель.

Водород. Как показано выше, наличие водорода и образуемых им водородных связей в ядре Земли - играет огромную роль в формировании внешнего ядра и мантии. Сравним энергетический вклад водорода в геодинамические процессы в мантии с тепловым потоком. Очевидно, что это весьма ориентировочная оценка, но она говорит о несомненном участии водорода в эволюции Земли. Итак, потери водорода составляют примерно 1/5 от массы Земли. Примем массу водорода $M_H \approx 10^{27}$ г. Энергию водородной связи примем равной 1 ккал/моль или 4кДж/г. Предположим, что все атомы водорода включены в водородные связи. Тогда общая энергия связей будет равна $4 \cdot 10^{27}$ кДж или $4 \cdot 10^{37}$ эрг, что составляет 2 % от полной гравитационной энергии Земли. Разделив эту величину на время эволюции Земли, получаем цифру (10^{28} эрг/год), сравнимую с величиной оцененного нами выше - теплового потока.

Как показано на сайте <http://www.sunhome.ru/journal/115698> на Земле может быть образовано 239 триллионов тонн углеводородов, что составляет $\approx 2.4 \cdot 10^{20}$ г. Даже без учета того, что на водород приходится только четвертая часть этой цифры, видно, что Земля уже потеряла водорода значительно больше.

Обратим внимание на такую деталь... По началу, мы предположили, что вещество внутреннего ядра, возможно, сохранилось до наших дней в том виде, в каком оно было при образовании Земли. В результате развития модели, мы приходим к заключению, что это предположение не совсем точно... Оказывается, что в течение эволюции Земли состояние термодинамического равновесия, вокруг которого могут совершаться (по модели) циклические колебания, постоянно смещается в сторону уменьшения температуры и давления. Этот факт говорит в пользу циклического характера эволюции Земли, т.к. линейная термодинамика необратимых процессов показывает, что колебания значений термодинамических параметров не могут происходить относительно равновесного состояния. Последнее означает, что только в такой (или подобной) модели могут происходить циклы, привлекающие пристальное внимание геологов.

4. 5. Эволюция рТ параметров на поверхности Земли.

Принято считать, что экзогенные процессы, происходящие на Земле, обусловлены главным образом: энергией солнечной радиации, силой тяжести, деятельностью ветра, воды и ледников. Заметную роль играет и внутренняя, эндогенная энергия Земли, из-за влияния которой происходят землетрясения, извергаются вулканы, поднимается и опускается уровень океанов и т.п.

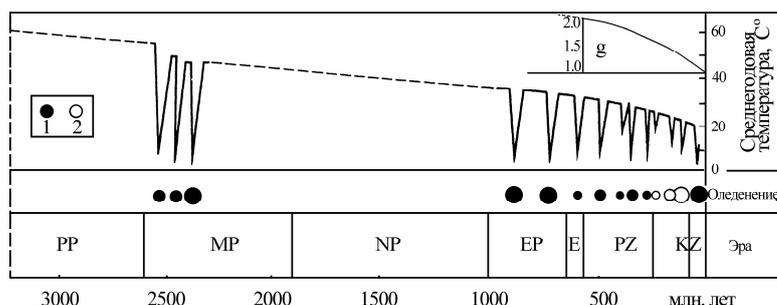


Рис. 4-6. Температура поверхности Земли. В правом верхнем углу зависимость: $g(t)$.

Хорошо известно, что Земля “пережила” несколько оледенений. Следуя В.Н.Саксу (1947), “... нужно отказаться от мысли, что оледенения были чем-то случайным в истории Земли. Особенно обращает на себя внимание то обстоятельство, что крупные оледенения всякий раз следовали за интенсивным проявлением складкообразовательных процессов. Так, четвертичные ледники появились после альпийской складчатости, верхнепалеозойские - после герцинской, протерозойские - после докембрийской. Напротив, эпохи обширных трансгрессий моря, предшествовавшие основным фазам складчатости, характеризовались относительным выравниванием климатов на земной поверхности ...” (с.29-30). Это один из примеров связи pT (давление-температура) параметров на поверхности Земли с внутриземными орогенными процессами. Надо сказать, что в наше время эти взгляды не разделяются большинством специалистов. Так, например, Чумаков (1995) полагает, что климатические изменения имеют ритмический характер, а «главные различия между ледниковыми и безледниковыми интервалами геологической истории заключались в увеличении амплитуд климатических колебаний. Это было связано, по-видимому, с совпадением холодных фаз сверхдлинных, длинных и коротких климатических колебаний, приводивших к возникновению криосферы и увеличению альбедо во время климатических минимумов» (с. 37). Бытующее среди многих геологов мнение, относительно того, что эволюция Земли состоит из сочетания суммы разнофазных колебательных процессов, не согласуется с обсуждаемой на страницах этой книги моделью Земли, как открытой, самоорганизующейся диссипативной системы. Изменение климата и его связь с геомагнитным полем рассмотрено ниже, в разделе VI.

Наиболее важная характеристика климатического процесса – это температура и ход её изменения в развитие этого процесса. Поэтому, несомненный интерес представляет зависимость температуры поверхности Земли от времени её эволюции. Несмотря на то, что многие геологи, так же как Дж. Ферхуген и др. (1974) считают, что “... мы еще очень далеки от действительного понимания термальной истории Земли” (с. 739), такая зависимость для Земли известна. Она построена многими авторами по изотопным соотношениям (кислорода O^{16}/O^{18} и водорода/дейтерия) и восстановленному палеотемпературному градиенту. Среди авторов (см. например, Шульдинер, 1985) имеются небольшие расхождения в величинах температур для одних и тех же периодов эволюции Земли, но общий характер остается примерно одинаковым (см. рис. 4-6). По видимому, есть основания считать, что температура на поверхности Земли примерно 3.8 млрд. лет назад приближалась к $100^{\circ}C$ (Океаны кипели! Если не учитывать тот факт, что плотность атмосферы была выше современной). Можно восстановить (Кузнецов, 1990) эту зависимость для ранней Земли, ко времени 4.5 млрд. лет назад. Температура окажется порядка $300^{\circ}C$ (и более). Это, однако, не самая высокая оценка температуры поверхности ранней Земли, например, согласно Р. Геррелсу и Ф. Маккензи (там же, с. 79): “... температура на поверхности ранней Земли достигала $600^{\circ}C$, а давление превышало 360 атмосфер, из которых на долю воды приходилось 300, углекислоты - 45, соляной кислоты

10 атм”. Различные авторы попутно неоднократно высказывали идею, согласно которой древняя атмосфера Земли соответствует атмосфере современной Венеры.

Таблица 4.3.

Период	Возраст, млрд. лет	Температура поверх. °С	Атмосферное давление, атм.	Состав атмосферы
Катархей	3.75 - 3.5	100	20	H ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Палеопротозой	3.5 - 2.6	70	10 - 20	H ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Мезопротозой	2.6 - 1.9	60	-	H ₂ O, 1% O ₂ ,
Неопротозой	1.9 - 1.0	50	-	Увеличение O ₂
Эпипротозой	1.0 - 0.65	40	-	Увеличение O ₂
Эокембрий	0.65 - 0.57	35	-	Увеличение O ₂
Настоящее время	0	15	1	21% O ₂

Наиболее полно данные по pT условиям на поверхности ранней Земли (в докембрии) представлены в монографии Салопа (1982). Извлеченные нами из этой книги данные представлены в таблице 4.3. Из этой таблицы, как и из рисунка 4-6, следует, что температура поверхности Земли и её атмосферное давление плавно понижались в течение всего периода эволюции. Менялся химический состав атмосферы: исчез водород, уменьшилась концентрация воды, выросла концентрация кислорода и т.п.

Можно ли найти простую логичную модель, описывающую эволюцию условий на поверхности Земли? Верно ли предположение о том, что pT условия ранней Земли адекватны современной Венере? Попробуем ответить на эти вопросы в контексте нашей модели.

В момент образования вещество Земли имело солнечный состав: в основном, это были водород, кислород, кремний, железо и т.д. Оно, как следует из нашей модели, было нагрето до очень высокой температуры. Зададим температуру поверхности Земли (собственно твердой “поверхности”, как таковой, - ещё не было) равной 10^3 К. Эта величина оценивается следующим образом. Температура плазмы вещества Земли в момент образования достигала нескольких электронвольт ($1 \text{ эВ} \approx 10^4$ К). Радиационное (за счет излучения) охлаждение должно было сравнительно быстро “сбросить” температуру окружающего плазму т.н. обменного слоя, примерно на порядок. Рассмотрим, как происходит охлаждение такого тела за счет излучения. Будем придерживаться канвы рассуждений, изложенной в двух монографиях (Бай Ши-и, 1968; Зельдович и Райзер, 1966).

Потери энергии на излучение K равны интегралу по объему от потери энергии q элементарного объема в единицу времени. Так как $q = \text{div } S_o$, то можно записать, используя выражение из книги (Зельдович, Райзер, 1966; с. 143):

$$K = \int q dV = \int S_o d\Sigma, \quad (4.6)$$

где dV - элемент объема тела, $d\Sigma$ - элемент его поверхности, S_o - нормальная составляющая потока излучения на поверхности тела: $S_o = \sigma T^4$, T - температура поверхности тела, σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Горячие газы и пары нелетучих веществ, окружающие только что сформировавшуюся Землю можно представить как “оптически толстое тело”, размеры которого x гораздо больше длины “пробега” охлаждающего излучения l . Величина l представляет собой характерное расстояние, которое проходит квант излучения без столкновений и рассеяния. Она обратно пропорциональна коэффициенту поглощения излучения χ : $l \sim 1/\chi$. С учетом сказанного, поток излучения $S^* \approx (l/x) \times \sigma T^4$ для “оптически толстого тела” (где: $l/x \ll 1$) существенно меньше S_o .

Известно, что величина l уменьшается с увеличением температуры. Для воздуха, в приближении Росселанда (Бай Ши-и, 1968, с. 115):

$$1/l = 4.86 \cdot 10^{-7} p^{1.31} \times \exp(4.56 \cdot 10^{-4} T). \quad (4.7)$$

Для не слишком высоких температур ($T \approx 10^3$ К), экспоненциальный множитель примерно равен единице, поэтому формулу можно упростить:

$$1/l \approx 5 \cdot 10^{-7} p^{1.3}, \quad (4.8)$$

где l в см, а p в атм. Для современной атмосферы Земли величина l порядка $2 \cdot 10^6$ см, величина x примерно того же порядка, так что $l/x \approx 1$ и $S_o = S^*$, однако, это было совсем не так на более ранних этапах эволюции Земли.

Рассмотрим характер радиационного охлаждения поверхности Земли в течение времени её эволюции. Обозначим начальную температуру поверхности в момент времени t_0 через T_0 . Тепловая энергия Земли E может быть записана так:

$$E = c_V M T_0,$$

где c_V - теплоемкость вещества охлаждаемого слоя Земли, M её масса. Тепловая энергия Земли значительно выше, но так как за счет конечного времени теплопроводности, в охлаждении принимают участие лишь поверхностный слой, подобная оценка правомерна.

Порция энергии ΔE , “уносимой” за счет радиационного охлаждения, определим в соответствии с формулой для S^* :

$$\Delta E \approx (l/x) \times \sigma T^4 s t, \quad (4.9)$$

где s - поверхность Земли, а t - интервал времени. В наших оценках принимаем: $t = 0.5 \cdot 10^9$ лет. По прошествии t -лет, температура T_0 уменьшится и станет равной T_1 , а тепловая энергия Земли станет равной:

$$E_1 = c_V M T_1 = c_V M T_0 - (l/x) \times \sigma T_0^4 s t, \quad (4.10)$$

или:

$$T_1 = T_0 [1 - ((l/x) \times \sigma T_0^3 s t) / c_V M]. \quad (4.11)$$

Таким образом, получаем формулу вида:

$$T_1 = T_0 (1 - \alpha T_0^3), \quad (4.12)$$

в которой, как мы выяснили, содержится информация о температуре и плотности атмосферы. Очевидно, что для последующего (второго) интервала времени:

$$T_2 = T_1 (1 - \alpha T_1^3) \text{ и т.д.} \quad (4.13)$$

Величина α ($\alpha \sim [T_1 - T_2] / T_1^4$) зависит от температуры и текущего значения l , т.к. все остальные величины в формуле α не меняются (при условии, что остается постоянной величина поверхности Земли - s).

Оценим, насколько полученная нами зависимость правдоподобна и соответствует данным по ходу температуры на ранних этапах эволюции Земли, приведенным в таблице. Для этого построим график: $lgT - lgt$ (рисунок 4-7). Рисунок показывает, что в течение 3 млрд. лет (от 0.5 до 3.5) характер охлаждения поверхности Земли не менялся. По-видимому, он был другим в течение первого млрд. лет эволюции Земли, но для его изучения наших данных явно недостаточно. С течением времени, величина α (в рассматриваемом нами диапазоне от 0.5 до 3.5 млрд. лет) незначительно увеличивалась и составляла величину $\alpha = (3 - 5) \cdot 10^{-10} \text{ К}^{-3}$. (Наши более ранние оценки (Кузнецов, 1990), соответствовали величине $\alpha = 10^{-9} \text{ К}^{-3}$). Величина l оказывалась порядка 1 м, что на четыре порядка меньше её современного значения.

Продолжим прямую $lgT - lgt$ в область более низких температур, тогда она пересечет изотерму 15° C в точке, соответствующей примерно 50 млн. лет назад. Температура 15° C , это примерно среднегодовая современная температура поверхности Земли, определяемая величиной инсоляции. Если бы это было действительно так, то вплоть до этого периода времени (50 млн. лет назад) температура поверхности Земли зависела бы только от внутренней, эндогенной причины. По всей видимости, учитывая инерционный характер тепловых процессов, в такой системе не должно происходить оледенений.

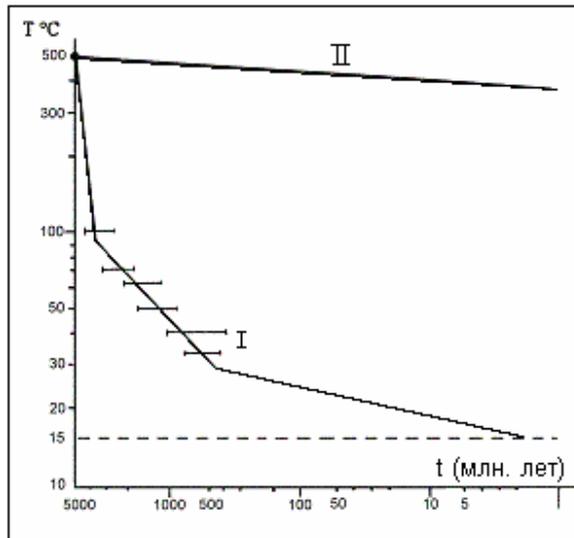


Рис. 4-7. Температура Земли (I) и Венеры (II) в течение времени эволюции.

Оледенения на Земле были, это общепризнанный факт. Поэтому, такое продолжение температуры в область времени, меньше чем 500 млн. лет назад, неправомочно. По-видимому, примерно 400-500 млн. лет на Земле произошло изменение режима её эволюции. По нашей модели, - начался период интенсивного расширения. Этот факт мог бы объяснить резкое увеличение α , например, за счет возрастания площади поверхности Земли и т.п.

Здесь уместно отвлечься и сказать несколько слов о причине оледенений, и их связи с внутренними, эндогенными процессами, о которых писал Сакс. Период (этап) расширения Земли (согласно нашей модели) связан с резкой интенсификацией её вулканической и горообразовательной деятельности. В такой период времени, в атмосферу Земли выбрасывается огромное количество пепла, который, надолго оставаясь в атмосфере, экранирует от Земли солнечное тепло. Если при этом температура поверхности Земли определялась солнечным теплом (как сейчас), а не внутриземным тепловым потоком (который в настоящее время намного меньше, чем поток тепла от Солнца), то её охлаждение поверхности в периоды экранировки и оледенения очевидны. Если в истории Земли происходили оледенения в рассматриваемый нами период (от 0.5 до 3.5 млрд. лет назад), то наша модель охлаждения была бы верна при одном условии: уровень инсоляции в те далекие времена был значительно выше современного, или иначе, Солнце было значительно “горячее”, чем сейчас.

Вернемся к нашим оценкам. Полученное нами значение параметра α позволяет, в приближении Росселанда, оценить температуру поверхности и величину атмосферного давления. Эти величины (Кузнецов, 1990) оказались равными: температура $T \approx 800$ К, а давление $p \approx 10^3$ атм. Заметим, что эти оценки носят грубый, ориентировочный характер, однако, тем не менее, они (по смыслу) совпадают с данными, полученными геологами для pT -условий ранней Земли.

Как ответить на вопрос: соответствует ли современная “обстановка” на Венере обстановке на поверхности молодой Земли? Предположим, что Венера была изначально нагрета сильнее, чем Земля. Допустим, что относительный перегрев составлял, например, 100° С. Допустим так же, что толщина атмосферы Венеры изначально была больше земной примерно в два раза, а начальное давление, в три раза выше. Всё это может привести к тому, что величина коэффициента α атмосферы Венеры окажется меньше чем у Земли примерно на порядок. Для оценок, примем для начальной атмосферы Венеры:

$\alpha = 3 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-3}$. При этом характер изменения температуры поверхности меняется существенным образом (см. рис. 4-7). Вполне возможно, что незначительные изменения начальных условий на поверхности Венеры, относительно условий на Земле, привели к тому, что Венера остывала (и продолжает остывать) более медленно, чем Земля.

Уровень океанов и цикличность эволюции. Как изменялся “лик” нашей планеты в течение 4.5 млрд. лет её эволюции? Иначе, всегда ли Земля выглядела так, как сейчас? На эти, казалось бы, очевидные вопросы, науки о Земле не дают четкого, однозначного ответа. Сегодня принято считать, что “на Земле раньше было так же, как сейчас” (принцип актуализма). Различия состояли лишь в том, что материки, то объединялись в единый, громадный материк, то разъединялись, “расползаясь” по своим местам, и затем объединялись вновь. В зонах спрединга “производилась лента конвейера”, с помощью которой материки “плавали как корабли по океану”, а в зонах субдукции, эта лента затягивалась в мантию, чтобы вновь выйти на поверхность в зонах спрединга. Известно, что материки, это древние, как правило, гранитные образования. Это известно давно. Однако еще в первой половине нашего века было принято считать, что дно океанов столь же древнее образование. Сенсацией прошлого века в науках о Земле, было открытие факта наличия на дне всех океанов очень молодых базальтовых пород, срединно-океанических хребтов (зон спрединга) и, собственно, движения, дрейфа материков. Это открытие “родило” т.н. тектонику плит, которая сразу и безоговорочно заняла главенствующие позиции в геологии. Основным, бесспорным достижением (я бы назвал это даже открытием) плитной тектоники считается то, что Земля в настоящее время динамично развивается. Другое дело, спорить о причинах и следствиях геодинамики, о физике процессов дрейфа и, собственно, о физике Земли. Здесь же споров практически не было: факт наличия динамики необходимо было объяснить в рамках принятой модели холодной Земли.

Обратимся к фактам, объяснение которых породило плитную тектонику. Как мы уже отмечали, все началось с изучения дна океанов. (Заметим, что океаны составляют 2/3 поверхности Земли и в значительной степени определяют “лик” нашей планеты). Факты и гипотезы об океанах наиболее обстоятельно и убедительно изложены в книге Е.М. Рудича (1984), который показывает, что объем мирового океана значительно увеличился в течение последних 160 млн. лет (рис. 1-10). Эти данные получены на основании анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин пробуренных при выполнении почти 70 рейсов судна “Гломар Челленджер”) акватории Мирового океана; исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением, и анализа глубины и условий накопления океанических осадков.

Изучение акватории Мирового океана показало, что общие черты имеются у всех океанов Земли и, тем не менее, есть различия между ними. Многие геологи отмечают различия между океанами тихоокеанического типа и атлантического. К общим особенностям можно отнести: одинаковый возраст (160 млн. лет), наличие зон полосовых магнитных аномалий и зон т.н. спокойного поля. Основное различие между океанами состоит в том, что атлантический тип (который присутствует и на Тихом океане) связан с расширением и разрастанием океанического дна через срединно-океанический хребет (СОХ). В этом случае полосовые магнитные аномалии параллельны друг другу, а разрыв океанической коры в районе СОХ произошел тогда, когда кора не могла растягиваться, как это имело место в Тихом океане, а была в достаточной степени прочна и консолидирована (Кузнецов, 1990). Растяжение океанической коры в тихоокеаническом варианте сопровождается совершенно другой структурой полосовых магнитных аномалий. На Луне, как и на Земле, можно выделить базальтовые «моря» атлантического и тихоокеанического типов (Макаренко, 1983). Автор, анализируя геодинамические структуры Земли и Луны, приходит к важным для нашей модели выводам. Во-первых,

развитие Земли и Луны происходит под действием одних и тех же глубинных, эндогенных сил, и, во-вторых, Луна, есть не что иное, как упрощенная модель Земли.

Расчеты, приведенные в книге Рудича, показывают, что за последние 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке, - на 580 млн. км³. При средней глубине современных океанов порядка 4-х км, это соответствует примерно 1/3 площади поверхности современной Земли. За последние 160 млн. лет эволюции Земли её радиус увеличился от $\approx 0.77R$, - до его современного значения. Резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Он обращает внимание на то, что “... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. ... мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет” (Рудич, 1984, с.232).

Совсем не так “воспринимает” этот факт наша модель, согласно которой большая часть мантии была образована на Земле именно в течение этих 160 млн. лет (см. рис. 4-1). Если учесть, что в базальтах экспериментально обнаружено наличие воды в количестве $\approx 0.1\%$, а так же учесть, что масса воды Мирового океана так же составляет примерно 0.1% от массы мантии, то этот факт может служить еще одним подтверждением правомерности нашей модели горячей Земли.

Можно ли доверять таким данным, которые показывают резкое увеличение объема океанов, начавшееся 160 млн. лет назад? Выяснению этого вопроса посвящена статья Стейнера (Steiner, 1977), в которой автор приводит данные по скорости увеличения площади поверхности океанов: Тихого, Атлантического и Индийского. Данные получены на основании изучения полосовых магнитных аномалий. Площадь Тихого океана начала резко увеличиваться 165 млн. лет назад (см. рис. 1-10), одновременно, но с меньшей интенсивностью, стала возрастать площадь северной части Атлантического океана. Чуть позже, 135 млн. лет назад в процесс роста океанов “включился” Индийский океан и южная часть Атлантики. Суммарная скорость роста площади трех океанов составляет, по верхней оценке Стейнера, примерно 3000 км² за тысячу лет, в течение 165 млн. лет их развития. Если подсчитать площадь образовавшихся океанов, то окажется (по верхней оценке), что за это время их площадь примерно равна площади поверхности Земли (5×10^8 км²). Учитывая неточности и то, что мы использовали верхнюю оценку, эту величину можно уменьшить вдвое, но все равно оказывается, что практически все океаны Земли образовались в течение последних 160 млн. лет. Стейнер не приводит таких очевидных оценок, он допускает, что радиус Земли увеличился за это время, но ограничивает это увеличение примерно 12%. Оставшаяся часть площади увеличившихся океанов должна быть, по мнению Стейнера, “поглощена” субдукцией, интенсивность которой, как следует, тоже должна возрастать по мере роста площади океанов.

В течение последних 135-165 млн. лет скорость спрединга, по Стейнеру, постоянно возрастала вплоть до наших дней. За последние 5 млн. лет средняя скорость спрединга для Тихого океана составляла 9.6 см/год, для Индийского океана - 7.6 см/год и для Атлантического - 4.3 см/год.

Современные океаны возникали, расширялись и “раздвигали” материи, которые, судя по всему, 160 млн. лет тому назад были значительно ближе друг к другу. Рисунок 1-10 (Courtillot, Besse, 1987) демонстрирует это, показывая, что раньше других (160 млн. лет) Африка отделилась от Северной Америки, затем (150 млн. лет) - от Африки отделился Мадагаскар. Позже (135 млн. лет) Африка разделилась с Южной Америкой и т.д. Разрывы проматерика на современные его части, и их раздвижение объясняется в рамках модели холодной Земли и тектоники плит наличием мантийной конвекции. Обсуждаемый нами парадокс, связанный с быстрым увеличением объемов воды Мирового

океана, вообще не рассматривается, т.к. не может быть объяснен этими моделями. Однако никакая мантийная конвекция не способна найти объяснение раздвижению материков на сфере с современным радиусом. Об этом ещё тридцать лет тому назад писал Р. Мезервей (Meservey, 1969). Он обратил внимание на расположение материков вдоль “берега” Тихого океана. Южная Америка, Северная Америка, Азия, Австралия и Антарктида никогда не находились на расстояниях, больших, чем современные (см. рис. 1-9). Это верно, по крайней мере, в течение последних 160 млн. лет. Иначе, периметр Тихого океана в течение этого промежутка времени никогда не был больше современного. Об этом свидетельствует и рис. 1-10, где показано, что Австралия и Антарктида “расстались” всего 50 млн. лет назад, Южная Америка - с Антарктидой “совсем недавно”, а Южная и Северная Америки и Азия, - так и “не расставались”. Если сохранять условие постоянства (или очень небольшого увеличения) периметра Тихого океана, то каким же образом, спрашивает Мезервей, можно соединить Африку с Южной Америкой, которые разъединились друг с другом примерно 135 млн. лет назад? Ответа нет на этот, надо сказать, очень простой вопрос. Его нет, и не может быть, - в рамках плитной тектоники в том упрощенном виде, как её преподают в школах и университетах.

Несмотря на, казалось бы, убедительные факты, далеко не все геологи разделяют точку зрения, согласно которой океаны в основном сформировались на Земле лишь в “последние” 160 млн. лет. Тем не менее, никто из них не отрицает факта бурного роста океанической коры и увеличение объема воды Мирового океана именно в этот период эволюции Земли. Здесь многих привлекает период, о котором мы уже говорили, продолжавшийся с 120 млн. назад до 80 млн. лет. В течение этого периода не было инверсий, это так называемый период спокойного магнитного поля, или, его называют ещё, - меловой суперхрон. Принято считать, что в этот период Земля изменила характер эволюции и вместо спрединга океанической коры, наращиваемой посредством “работы” СОХ, она увеличивала объем путем генерации плюмов (Larson, 1991; Fuller, Weeks, 1992). Авторы этих и большого количества подобных публикаций, сопоставляют период спокойного магнитного поля с периодом интенсификации образования плюмов. Некоторые авторы (Larson, 1991), показывают в своих работах, что характер эволюции Земли в эти периоды (суперхроны - суперплюмы) резко отличался как от периодов предыдущих, так и последующих. В частности считается, что именно в эти периоды на Земле были образованы основные запасы нефти и других углеводородных полезных ископаемых. Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон и другие, более ранние периоды. (Обратим внимание на то, что отмечаемые нами здесь корреляции не находят объяснения в рамках модели холодной Земли).

Не менее удивительны и другие синхронные проявления активности Мирового океана, атмосферы и климата: эти корреляции известны геологам как трансгрессии и регрессии. Например, Мёрнер (1986) исследовал несколько катастрофических событий, одно из которых произошло на Земле на рубеже эоцена и олигоцена (рис. 4-8), когда наблюдалось крупное похолодание, падение уровня моря и уменьшение разнообразия форм фауны. Ряд подобных катастрофических событий случились на Земле сравнительно “недавно”, в период времени, называемый палеомагнитологами эпохой Брюнеса. Выделяются несколько событий, причем последнее из них - Гетеборг (Палеомагнитология, 1982; Мёрнер, 1986). Это событие происходило от 20 до 12 тыс. лет тому назад. Событие Гетеборг выделено в истории геомагнитного поля как экскурс. Это событие, как и ряд подобных (рис. 4-8), предшествующих, характеризуется рядом признаков:

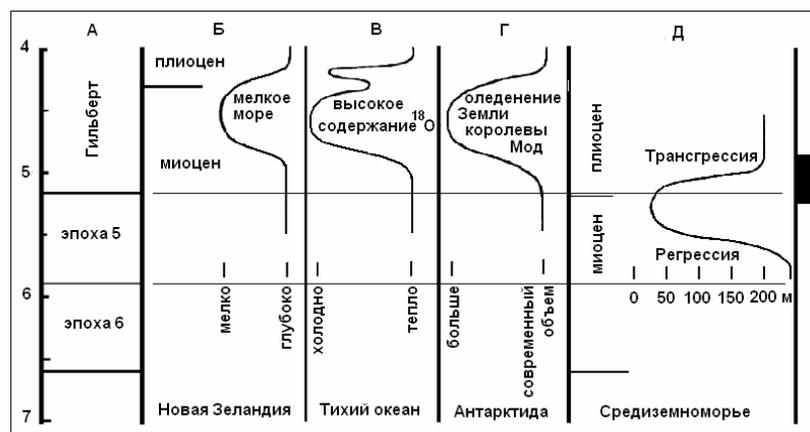


Рис. 4-8. Событие на границе миоцена и плиоцена (Мёрнер, 1986).

- аномально высокое изменение уровня моря на 200 - 240 м, с последующим его подъемом;
 - понижение температуры и наступление ледников в Северной Америке и севере Европы и последующее резкое их таяние;
 - резкое увеличение вулканической деятельности и последующее её прекращение.
- Заметим, что событие Гетеборг - единственное, которое произошло на памяти цивилизованного человека, так как все предыдущие “пришлись” на малоцивилизованное человечество и не остались в его памяти. Мёрнер считает, что событие Блейк, например, характерно тем, что сведения об изменении уровня моря противоречивы, а именно - 70-метровая регрессия на Новой Гвинее и 50-метровая трансгрессия на Гавайях; четких данных об оледенениях нет, хотя изменения параметров Миланковича зафиксированы и т.п. Наиболее полно в этом плане исследовано событие, которое имело место при смене эпохи 5 на эпоху Гильберт (см. рис. 4-8). При этом полярность геомагнитного поля, как и в предыдущих случаях, изменялась от современной (N) - к противоположной (R). Это событие сопровождалось:
- сменой миоцена на плиоцен;
 - регрессией и следующей за ней трансгрессией на Средиземноморье;
 - оледенением Антарктиды;
 - регрессией и трансгрессией в Новой Зеландии.

Мёрнер связывает возможную причину наблюдаемых событий с процессами, происходящими в глубоких горизонтах Земли, возможно, на границе ядро-мантия. Такие события, по мнению Мёрнера, приводят к изменению формы геоида, что, в конечном счете, вызывает изменение уровня Мирового океана, регрессии и трансгрессии.

Итак, на Земле происходили глобальные катастрофические явления: массовые вымирания, оледенения, потопа, периоды интенсивного вулканизма, магматизма и сейсмичности сменялись периодами спокойного развития планеты. Некоторые из этих явлений наблюдаются и в наше время, хотя и заметно меньшего, чем раньше, масштаба. Модель горячей Земли находит непротиворечивое объяснение этим явлениям. По своей физике, наша модель базируется на функционировании фазовых переходов первого рода, которые, по определению, имеют “катастрофические” решения (Кузнецов, 1992).

Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции и, например, в частности, в чем состоял механизм образования нефти и газа. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон произошедший в период 250 - 165 млн. лет, который так же как меловой имел современную полярность геомагнитного поля. Поле каменноугольного суперхрона (320 -

250), предыдущего юрскому суперхрону, – имело отрицательную полярность (Харленд, 1985). Периоды суперплюмов перемежались частыми инверсиями геомагнитного поля.

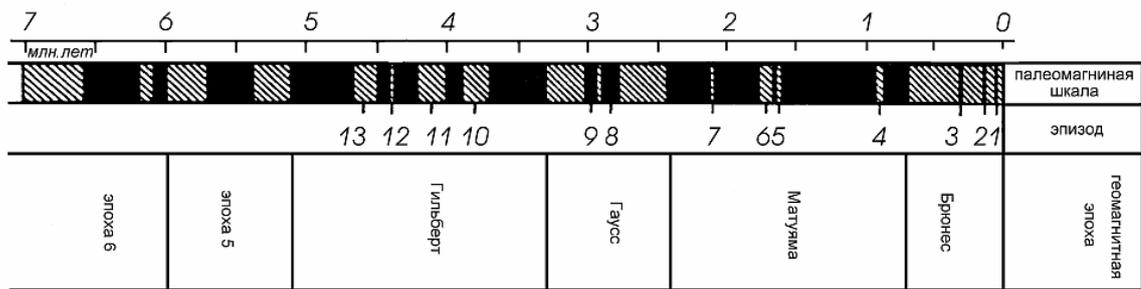


Рис. 4-9. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн лет.

Обратим внимание на рис. 4-1 откуда следует, что, к примеру, 200 млн. лет тому назад объем океанов M_0 составлял примерно 0.35 от объема современных океанов ($M_0 = 0.35M$, что подкрепляется данными Рудича), а земной радиус (по модели) составлял $0.7R$ от современного радиуса Земли. Средняя глубина современных океанов h , которые занимают $2/3$ (0.66) поверхности Земли S , равна $4 \text{ км} = M/S = M/0.66R^2$ (опуская 4π). Массу современного океана можно выразить следующим образом: $M = 0.66 hR^2$, тогда масса палеоокеана (200 млн.лет) $M_0 = 0.35 \cdot 0.66 hR^2$. Радиус Земли 200 млн. лет тому назад $R_0 = 0.7 R$, а площадь $S_0 = S \approx 0.5 R^2$. Положим, что площадь материков остается без изменения в процессе эволюции Земли и она равна: $S_{mat} = 1/3 R^2$. Площадь поверхности океанов 200 млн. лет тому назад можно выразить: $S_{ok} = 0.5 R^2 - 0.3 R^2 = 0.2 R^2$. Тогда глубина древних океанов может быть оценена: $h_0 = hM_0/0.2 R^2 = 0.35 \cdot 0.66 h/0.2 \approx h$. Приведенная оценка показывает, что если считать, что уровень океана определяется его глубиной h , то, согласно нашей модели, уровень океана остается практически неизменным в ходе эволюции Земли, что и требовалось доказать.

Наша модель позволяет оценить величину h на начальном этапе эволюции Земли. Обратимся ещё раз к рис. 4-1-б, откуда следует, что 4 млрд. лет тому назад толщина мантии составляла всего 300 км, а радиус Земли, соответственно, $0.6 R$, $S_{ok} = 0.36 R^2 - 0.3R^2 = 0.06 R^2$. Масса океана не превышала $0.1 M$; $h_0 = hM_0/0.06 R^2 = 1.6 h$ (6.5 км!). По-видимому, эта оценка не верна, т.к. трудно представить, что мог образоваться такой глубокий океан, в то время как все материки были сушей. Поделим массу палеоокеана (4 млрд. лет) на всю поверхность Земли $0.36 R^2$, тогда $h_0 = hM_0/0.36 R^2 = 0.28 h$, или примерно 1 км. Таким образом, из модели горячей Земли следует, что *большая часть материков находилась под водой*, что соответствует геологическим данным.

Регрессии – трансгрессии - складчатость – вулканизм – оледенения. Рассмотрим последовательную во времени цепь этих явлений, для чего воспользуемся основными понятиями и терминами модели горячей Земли. В этом плане, регрессия, т.е. уменьшение уровня океана, происходит в момент цикла расширения, когда радиус Земли увеличивается и, соответственно, возрастает площадь поверхности Земли и объем мантии. В течение этого времени вода, масса которой увеличивается при росте мантии, еще существует в области формирования мантии и требуется некоторое время для транспортировки воды на поверхность Земли. За циклом регрессии, по этой модели, сразу следует цикл трансгрессии, который можно разбить на два связанных друг с другом этапа. В течение первого, как отмечалось, происходит транспортировка воды от ядра через астеносферную зону СОХ к поверхности Земли. После цикла расширения, следует цикл сжатия Земли, поэтому, во время второго этапа происходит увеличение количества воды в океане в связи с уменьшением площади поверхности Земли. По времени, эти процессы трудно отделимы друг от друга. Например, в настоящее время на Земле продолжается цикл сжатия – регрессии, однако поступление т.н. ювенильной воды в океане –

продолжается. В цикле сжатия на Земле возрастает складчатость земной коры. При этом происходит рост гор, увеличение интенсивности вулканических извержений, что, в свою очередь, приводит к выбросу в стратосферу вулканической пыли, вызывающей похолодания и оледенения.

Рассмотрим одну из возможных и наиболее вероятных причин, почему в момент трансгрессии уровень океана довольно часто повышается именно до того уровня, который существовал до начала регрессии. Обозначим: высоту регрессии - h_R , трансгрессии - h_T . Оценим отношение этих величин в цикле сжатие-расширение, учитывая, что из наблюдений: $h_R \approx h_T$. Обозначим: приращение радиуса Земли в цикле расширения - ΔR , увеличение площади поверхности Земли - ΔS , увеличение массы океанов - $\Delta M_o = k\Delta M_M$, где M_M - масса мантии, а коэффициент k , показывающий содержание воды в базальте, $\approx 10^{-3}$. Здесь формально, для оценок, принято, что мантия состоит из базальта.

- На первом этапе в момент расширения масса океанов остается неизменной: $M_o = \text{const}$, уровень океанов $h_o = M_o/S_o$. Площадь поверхности океанов, равная примерно 2/3 поверхности Земли, равна $S_o \approx 4R^2$; поверхность Земли возрастает в цикле расширения (увеличения радиуса на ΔR): $S_R = 4(R^2 + 2R\Delta R)$; отсюда высота регрессии: $h_R \approx M_o/4R^2 - M_o/4(R^2 + 2R\Delta R) = M_o/4 (1/R^2 - 1/(R^2 + 2R\Delta R)) \approx M_o/4 \cdot 2\Delta R/R^3 = h_o \cdot 2\Delta R/R$.

- Высоту трансгрессии оценим из очевидного соотношения, показывающего рост мантии в цикле расширения: $\Delta M_M = \Delta R S_o$. Увеличение массы океанов $\Delta M_o = k\Delta R S_o = S_o h_T$, отсюда: $h_T = k \Delta R$.

- Полагая $h_R \approx h_T$, получаем: $h_o \cdot 2\Delta R/R \approx k \Delta R$, или: $k \approx 2 h_o / R \approx 10^{-3}$.

- Учтем эффекты, возникающие при сжатии Земли, последующей за циклом расширения. Сжатие приводит к некоторому уменьшению величины ΔR , поэтому сокращать эти величины в равенстве: $h_R \approx h_T$ не совсем корректно. Оценим величину эффекта сжатия, для чего перепишем формулы относительно ΔR , обозначим: ΔR_1 - растяжения и ΔR_2 - сжатия: $\Delta R_1 = h_R / h_o \cdot R/2$ и $\Delta R_2 = h_T / k$. Их отношение: $\Delta R_1/\Delta R_2 = h_R / h_T \cdot R/2h_o k$ определяется тем, как «отслеживает» глубина океанов - увеличение радиуса Земли. Заметим, что это очень незначительные поправки, находящиеся в пределах точности измерения эффектов трансгрессии и регрессии и самого уровня океана.

- Полученная оценка подтверждает вывод Рудича относительно того, что резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Это означает, что правило $h_R \approx h_T$, подтверждается не только на единичных циклах, но справедливо и в целом по Земле.

- Нами не учитывалось изменение формы геоида, которое вносит свой вклад в величину трансгрессии и регрессии. Развиваемый подход дает такую возможность, т.к. именно возмущение геоида в момент цикла расширения – сжатия в последующем компенсируется «течением» верхнего слоя земной коры и мантии, регистрируемое как дрейф плит (Кузнецов, 2005).

Увеличение массы мантии и объема океанов в течение времени эволюции можно считать глобальной трансгрессией, причем, как отмечал Рудич, резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Это свидетельствует не только о том, как считал Рудич, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Этот факт свидетельствует так же и о том, что масса океанов ($M_o \sim Sh_o$) увеличивалась синхронно с увеличением объема Земли ($M \sim SR$), а так как $R \approx 2 h_o / k$, то и $M \sim 2Sh_o/k$ - за счет образования и роста мантии, как это следует из модели горячей Земли. Эта оценка ещё раз объясняет, почему в процессе эволюции Земли, связанной с очевидным ростом объема океана, - береговая линия менялась незначительно.

Выясним возможную причину роли обширных трансгрессий моря, предшествовавших основным фазам складчатости, в выравнивании климатов на земной поверхности. Учтем, что согласно модели горячей Земли смена регрессии на трансгрессию является следствием смены режима фазового перехода, что, как будет показано ниже, является причиной смены полярности геомагнитного поля – инверсиям и экскурсам. В периоды инверсий и экскурсов Земля оказывается без магнитного поля и подвергается повышенной радиации космическими лучами. Если до этого события в стратосфере существовал пылевой слой, экранирующий Землю от Солнца, и, следовательно, Земля находилась в стадии оледенения, то повышенная радиация приводит к разрушению слоя пыли, потеплению и выравниванию температуры поверхности Земли. Если до инверсии на Земле ярко светило Солнце, определяя различия в температуре поверхности, то в момент инверсии радиация приводит к увеличению концентрации водного аэрозоля, что несколько охлаждает поверхность Земли, что так же как в первом случае – выравнивает температуру.

Периоды частых инверсий геомагнитного поля сменялись периодами, в течение которых поле своей полярности не меняло. Если частота инверсий составляла несколько инверсий в 1 млн. лет, то период времени без инверсий составлял около 40 млн. лет (рис. 2-б). Этот период эволюции носит название «меловой суперхрон». Считается, что ему свойственно увеличение частоты и интенсивности т.н. «суперплюмов». Согласно модели горячей Земли, в моменты суперхронов происходит перестройка конвективной системы в ядре Земли (Кузнецов, 1998-а, 1998-б), при этом режим устойчивого конвективного охлаждения внутреннего ядра сменяется режимом неустойчивой турбулентной конвекции. Он характеризуется тем, что возникают локальные перегревы поверхности внутреннего ядра, которые вызывают образование локальных, конвективных каналов, по которым происходит тепло и массоперенос от границы внутреннего ядра до границы ядро-мантия и далее, до поверхности Земли. Эти локальные переносы и называются плюмами. Они характеризуются, как отмечалось, повышенным тепло и массопереносом. Причем, каждый плюм представляет собой локальное явление, происходящее в «свое время» и в «своем месте» на земной поверхности. Если локальный перегрев происходит и во время периода инверсий, то и тут может возникнуть и развиваться плюм. Локальный плюм таким же образом, будет сопровождаться регрессией и трансгрессией, но не в целом по Земле, а будет приурочен «своему региону». В океане это т.н. зоны «спокойного поля». Возникновение суперплюмов, т.е. одновременно большого количества интенсивных, локальных плюмов, может вызвать на Земле значительные перемены, в то время как геомагнитное поле остается «спокойным». Эту, парадоксальную на первый взгляд, ситуацию комментирует Д.М Печерский (2003). Он задает вопрос, «почему именно во время наиболее стабильного спокойного состояния геомагнитного поля, а не во время всплеск высокой активности в ядре, приводящей к частым сменам полярности геомагнитного поля, происходят столь бурные процессы на поверхности Земли». Общепринятая модель Земли не дает ответа на этот и другие, рассматриваемые нами вопросы.

Таким образом, модель горячей Земли находит простое и очевидное объяснение рассматриваемым нами явлениям и их взаимосвязям, в том числе и явлению роста океана в течение последних 200 млн. лет. Находят непротиворечивое объяснение такие явления как регрессии и трансгрессии и их периодичность, определяемая функционированием фазовых переходов на границах земного ядра, а так же режимом конвекции в ядре и мантии.

4. 6. Упругие свойства вещества внутреннего ядра.

Модули упругости железа и вещества внутреннего ядра Земли. Принято считать, что ядро Земли железное, внутреннее ядро - в кристаллическом состоянии, внешнее – в виде

расплава. Этот тезис практически не подвергается сомнению, в то время как многочисленные экспериментальные факты не могут быть использованы в поддержку этого мнения. Считается, что знание упругости и реологии железа при давлении характерном для ядра Земли очень важно для понимания сейсмологических наблюдений, таких как малое затухание сейсмических волн, малые величины скоростей сдвиговых волн и анизотропия скорости распространения волн сжатия. Многочисленные группы геофизиков экспериментаторов и теоретиков получили значительное количество новых данных по реологии железа и, тем не менее, до сих пор остается не совсем ясным, как устроена Земля и её ядро, в частности.

Считается, что радиус внутреннего ядра увеличивается в течение времени эволюции Земли путем кристаллизации из расплава железа в виде гексагонального монокристалла. Внешнее ядро при этом остается маловязким, жидким и хорошо проводящим субстратом, обеспечивающим возможность гидродинамических течений вполне определенной, заданной конфигурации, необходимых для генерации геомагнитного поля. Следует добавить, что Земля обменивается с космосом энергией и веществом и поэтому её можно считать открытой системой. Земля генерирует тепловой поток, а так же ей свойственно наличие таких процессов как движение материков, вулканизм и сейсмичность, что всё вместе говорит о её диссипативном характере. Эти, казалось бы, очевидные каноны, тем не менее, содержат весьма значительные внутренние противоречия, которые мы попытаемся вскрыть при тщательном анализе известных, опубликованных данных.

В последнее время появились работы, в которых рассматривались реология, модули упругости и вязкость железа при давлении и температуре, свойственным ядру Земли (Boehler, 2000; Brown, McQueen, 1986; Зельдович и др., 1995; Mao et al., 1998; Steine-Neumann et al., 2001). С другой стороны, сравнительно недавно определена скорость сдвиговых волн, проходящих через внутреннее ядро (Кузнецов, 1997). По выражению Тромпа: обнаружен «святой Грааль» сейсмологии. Этим фактом доказано, что внутреннее ядро является твердым. Обнаруженная анизотропия внутреннего ядра истолкована так, что оно, возможно, представляет собой гексагональную структуру. Проведем сравнение между собой упругих модулей железа и вещества внутреннего ядра Земли, приведенных в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Модули упругости (GPa) и коэффициент Пуассона железа (при высоком давлении и температуре) и внутреннего ядра Земли.

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}	K	μ	σ	
1	1697	809	757	1799	421	444	1085	445	0.28	Mao et al., 1998
2	2130	2010	925	1470	140	60	1425	145	0.45	Steine-Neumann
3	1630	1284		1660	150	173	1400	170	0.44	наши оценки

В первой строке таблицы 4.4 приведены величины модулей железа (Mao et al., 1998) измеренные при давлении 211 ГПа и плотности железа $\rho = 12.8 \text{ г/см}^3$. В этой работе применялись статические и динамические методы для определения плотности и объемного модуля гексагонально (h.c.p.) упакованного железа при давлениях от 16 до 220 ГПа. Авторы использовали широкий набор экспериментальных методов, включая дифракцию рентгеновских лучей и сверхзвуковые методы. На одном кристалле определялись: модуль сдвига, тензор упругости, скорости волн сжатия и волн сдвига, и анизотропию этих скоростей в железе. Обнаружено, что скорость сдвиговых волн в железе значительно выше, чем во внутреннем ядре: $V_S = 5.9 \text{ км/с}$ в железе против $V_S = 3.65 \text{ км/с}$ во внутреннем ядре (см. рис. 1-11). Авторы наблюдали в железных образцах сильную решеточную анизотропию напряжения. Коэффициент Пуассона определен по величинам V_P и V_S .

Во второй строке Таблицы приведены рассчитанные упругие модули для h.c.p. железа при $\rho = 13 \text{ г/см}^3$ и температуре $T = 6000 \text{ К}$ (Steine-Neumann et al., 2001). Авторы вычисляли энергию Гельмгольца гексагональной решетки в изотермическом приближении и оценивали величины изотермических, упругих модулей. Затем, для оценки величин K и μ , эти модули преобразовывались в адиабатические постоянные. Оценка авторами коэффициента Пуассона σ (при $T = 5700 \text{ К}$) показала хорошее совпадение с величиной этого параметра, принятой для вещества внутреннего ядра.

В третьей строке Таблицы 4.3 приведены оцененные нами модули упругости вещества внутреннего ядра. Здесь принято, что скорость Р-волн, равная 11.2 км/с соответствует: $V_P'' = (C_{11}/\rho)^{1/2}$. Учитывая анизотропию внутреннего ядра, состоящую в том, что скорость Р-волн, проходящих вдоль оси вращения (обозначим их V_P') примерно на $1 - 2 \%$ больше, чем скорость волн, проходящих в экваториальной плоскости (V_P''), примем: $V_P' = 11.3 \text{ км/с}$. Скорость сдвиговых S-волн, проходящих через внутреннее ядро в экваториальной плоскости, равна $V_S'' = 3.65 \text{ км/с}$ (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Положим, что величина коэффициента Пуассона (σ) во внутреннем ядре анизотропией не обладает, тогда, полагая, что $\sigma = 0.44$, величина скорости $V_S' = 3.7 \text{ км/с}$. Принимая плотность внутреннего ядра $\rho \approx 13 \text{ г/см}^3$, получаем величины модулей упругости внутреннего ядра, приведенные на третьей строчке таблицы 4.4. В этой строке пропущено значение модуля C_{13} . Оценить его величину можно было бы по формуле (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/\beta = K = [(C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2)/C_S], \quad (4.14)$$

где $C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}$. Однако определение нами величины модуля K по этой формуле (в качестве её проверки), дает величину K для данных (Mao et al., 1998): $K = 690$, вместо 1085 , и для данных (Steine-Neumann et al., 2001): $K = 900$, вместо 1425 . По-видимому, этой формулой пользоваться не стоит. Тем не менее, если, к примеру, знать точные величины всех упругих модулей, можно было бы, в принципе, определить отношение c/a (Steine-Neumann et al., 1999) гексагональной решетки внутреннего ядра. Зная величины модулей упругости, можно сравнить параметры анизотропии для всех трех случаев, представленных в таблице 4.4.

Параметр анизотропии волн сжатия (Steine-Neumann et al., 1999) $\Delta_P = C_{33}/C_{11}$: в экспериментах (Mao et al., 1998) $\Delta_P = 1.06$; при расчетах (Steine-Neumann et al., 2001) $\Delta_P = 0.69$; во внутреннем ядре, как следует из измерений скоростей Р-волн, $\Delta_P = 1.02$. Аналогичный параметр для сдвиговых волн - $\Delta_S = C_{44}/C_{66}$. В первом случае $\Delta_S = 0.94$, во втором - $\Delta_S = 2.3$ и в третьем (во внутреннем ядре) - $\Delta_S = 0.87$.

Анализируя данные по величинам модулей упругости приведенным в таблице 4.4, можно уверенно утверждать, что: 1) измеренные модули упругости для гексагонального железа при давлении до 211 ГПа , модули оцененные теоретически для того же железа при температуре 6000 К и упругие модули, оцененные по скоростям Р- и S-волн во внутреннем ядре, не совпадают; 2) во всех рассмотренных случаях не совпадают и параметры анизотропии модулей упругости; 3) по-видимому, совпадение коэффициентов Пуассона во втором и третьем, случаях является следствием того, что в расчетах (Steine-Neumann et al., 2001) железо находилось почти в расплавленном состоянии, а, как известно, коэффициент Пуассона при плавлении: $\sigma \rightarrow 0.5$. Поэтому, подбирая соответствующую температуру твердого тела, всегда можно получить желаемую величину коэффициента Пуассона.

Известно, что скорость Р-волн во внутреннем ядре практически вдоль радиуса не меняется, оставаясь равной 11.2 км/с , величина давления при этом, изменяется от 320 до 360 ГПа . С другой стороны, известно, что скорость Р-волн в железе, в этом диапазоне давлений, - измерена (Mao et al., 1998). Здесь же показано, что скорость V_P , возрастает на $\Delta V_P \approx 1 \text{ км/с}$ при изменении давления от 320 до 360 ГПа . Если бы внутреннее ядро Земли действительно состояло из кристаллического железа, то скорость V_P , по мере

продвижения от границы ядра к центру Земли, должна возрасти до величины ≈ 12.2 км/с. Этот факт так же ставит под сомнение тезис относительно наличия кристаллического железа во внутреннем ядре.

Анализ данных, приведенных в Таблице 4.4, дает основание считать, что внутреннее ядро Земли не может состоять из кристаллического h.c.p. железа. Эти данные показывают, что внутреннее ядро твердое, обладает анизотропией упругости и, возможно, гексагональной структурой. Для того чтобы ответить на важный вопрос: как устроено ядро Земли, следует рассматривать его как структуру, состоящую из гомогенного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: жидкого – внешнего и твердого – внутреннего. Надо заметить, что это общепринятая точка зрения. Так же общепринятым считается, что твердая фаза образуется путем кристаллизации из расплава однородного вещества в его центральной части.

Рассмотрим этот процесс подробнее. Будем придерживаться канвы рассуждений, высказанных Лангером (Langer, 1980). Однако прежде сошлемся на то, что идея однородного вещества ядра Земли была подтверждена сравнительно недавним определением величины скорости сейсмических волн, проходящих через внутреннее ядро как сдвиговые. Речь идет об измерении скорости PKJKP-волны (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Как известно, величина этой скорости была оценена теоретически, исходя из учета уравнения Адамса и Вильямсона, при анализе факта возрастания скорости P-волн на границе внутреннего ядра. Оцененная таким образом величина скорости S-волн 3.5 км/с во внутреннем ядре практически совпадает с измеренной в (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Есть все основания считать, что вещество ядра Земли однородно по химическому составу и находится в различных фазах, как, например, лед и вода.

В общепринятой модели Земли, температура вещества внутреннего ядра выше температуры внешнего. Насколько подобная ситуация физически однозначна, и какие могут быть следствия из такого утверждения? Рассмотрим подобную задачу. Возьмем некое тело, состоящее из однородного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: в центре тела фаза II, при температуре T^{II} . Фаза II окружена веществом, в состоянии фазы I, при температуре T^{I} , причем, $T^{\text{II}} > T^{\text{I}}$. Для упрощения задачи примем, что тело находится в равновесии с окружающей средой и здесь теплообмена не происходит, в то же время рассматриваемая нами двухфазная система диссипативна, существует тепловой поток dQ от вещества в состоянии фазы II к веществу в состоянии фазы I. При выполнении этих условий, в такой системе продуцируется энтропия: $dS = dQ(1/T^{\text{I}} - 1/T^{\text{II}})$. Здесь $dQ > 0$ - количество тепла полученного фазой I от фазы II. Так как dS величина положительная (энтропия возрастает), а $(1/T^{\text{I}} - 1/T^{\text{II}}) > 0$, то:

$$dQ = c_V dT + L_T dV - U_{TV} d\xi$$

по условию, тоже должна быть величиной положительной. Здесь: c_V – теплоемкость при постоянном объеме, L_T – скрытая теплота изменения объема, U_{TV} – теплота фазового перехода (положительна при экзотермической реакции), ξ - степень полноты реакции (Пригожин, 2001). Для стационарных условий, когда $dT = dV = 0$: $dQ \sim -U_{TV} d\xi$ и, следовательно, для выполнения $dQ > 0$, необходимо чтобы теплота фазового перехода должна быть отрицательной величиной. Если принять, что фаза II – вещество в твердом состоянии, в I – жидкость (расплав), то условие $dS > 0$ выполняется только в том случае, если происходит плавление, и оно не выполняется, если происходит кристаллизация.

Задача, связанная с затвердеванием чистой субстанции из ее расплава, например, замораживание льда в образце чистой воды, (в математической постановке – задача Стефана) подробно рассмотрена Лангером (Langer, 1980). В случае чистого вещества, процесс затвердевания (кристаллизации) управляется тепловым потоком. Скорость затвердевания в любой точке на поверхности раздела “жидкость – твердое”, определяется тем, как быстро скрытая теплота плавления выделяется (или поглощается) в точке, где проводится выборка. Лангер рассматривает две возможных в эксперименте схемы, причем

в обоих случаях чистая жидкость содержится в камере, в которой её стенки поддерживаются при заданной температуре, меньшей, чем температура плавления. В случае наиболее близком к рассматриваемой нами ситуации, затвердевание происходит в центре камеры. Жидкость первоначально переохлаждена и её температура ниже температуры плавления, причем, затвердевания, как и следует из предыдущего, не происходит. Этот процесс начинается только в том случае, если в центр камеры вводится специальная затравка - ядро кристаллизации. Скрытая теплота фазового перехода должна быть отведена через жидкость для обеспечения роста кристалла путем конвективной транспортировки. Ситуация с началом кристаллизации из центра камеры нестабильна, поверхность раздела фаз (фронт кристаллизации) разбивается на дендриты, которые вырастают относительно быстро из центральной части твердого тела. Например, аналогичная ситуация имеет место при росте снежинок.

Исследования, выполненные Лангером, применительно к нашей ситуации, позволяют сделать важный вывод о том, что кристаллизация вещества внутреннего ядра в центре его расплава, возможна только в том случае, если его температура ниже температуры плавления, а начало кристаллизации инициировано специальной затравкой. Кроме этого, фронт кристаллизации неустойчив, а результат кристаллизации представляет собой типичную дендритную структуру. Расплав в такой структуре – это стекло, или переохлажденная жидкость, вязкость которой очень велика. Причем, вязкость жидкости на линии плавления повышается с ростом температуры (Скрипов, Файззулин, 2001). Так, например, вязкость воды при обычных условиях 10^{-3} Па с возрастает до 10^{12} Па с - в области стеклования (Скрипов, Файззулин, 2001). По всей видимости, вязкость железа внешнего ядра, при условии, что кривая распределения температуры будет идти по линии плавления и ниже, будет не меньше, чем у воды и составлять не менее 10^{12} Па с.

Надо сказать, что мнения, по поводу величины вязкости вещества внешнего ядра, - крайне противоречивы. По мнению Бражкина и Ляпина (2000), вязкость вещества внешнего ядра составляет от 10^2 Па·с до 10^{11} Па·с, по оценке Джеффриса - 10^9 Па·с (Джеффрис, 1960), по оценке Магницкого (1965) - 10^{12} Па·с. Наиболее часто употребляемое значение, полученное по анализу астрономических данных, - 10^8 Па·с. Сравним эти цифры с величиной вязкости расплава Fe-FeS измеренной экспериментально.

Расплав Fe-FeS принято считать основным кандидатом в состав внешнего ядра (Terasaki et al., 2001). В этой связи величина вязкости расплава, определенная экспериментально при температуре и давлении, соответствующим давлению и температуре внешнего ядра, представляет собой одно из наиболее важных физических свойств. Особую роль величина вязкости играет при исследовании динамики конвекции во внешнем ядре. Авторы (Terasaki et al., 2001) измерили вязкость этого расплава в диапазоне температур 1233-1923 К и давлений 1.5 - 6.9 ГПа, которая изменялась, соответственно, от 0.008 до 0.036 Па·с, что не намного больше, чем вязкость воды при нормальных условиях. Значительное несовпадение данных по величине вязкости экспериментальных (10^{-2} Па·с), теоретических (до 10^{13} Па·с) и полученных по анализу астрономических данных (10^8 Па·с) можно считать ещё одним аргументом против идеи железного ядра.

Рассмотрим фазовые диаграммы вещества Земли и железа. Имеют ли они общность, или между ними такая же большая разность, как между данными по упругости и вязкости? Здесь встречается определенная трудность, состоящая в том, что в отличие от железа, Земля представляет собой сложную многокомпонентную систему, уравнение состояния которой не может быть простым и однозначным, следовательно, не может быть простой и фазовая диаграмма. Выход один – построить фазовую диаграмму железа и сравнить его с «реперными» точками, присущими Земле.

Приведем термодинамические параметры железа: температура плавления 1539°C , температура кипения 2872°C , удельная теплоемкость $c_p = 641$ Дж/кг К, теплота плавления $U_{\text{п}} = 13.77$ кДж/моль ≈ 0.25 кДж/г, теплота испарения $U_{\text{и}} = 350$ кДж/моль ≈ 6.25 кДж/г,

критическая температура $T_c = 9600$ К, критическое давление $p_k = 8.25 \cdot 10^8$ Па, критическая плотность $\rho_k = 2.03$ г/см³. Воспользуемся этими данными при построении фазовой диаграммы железа (см. рис. 4-10). Зависимость температуры плавления железа при высоких давлениях от 50 ГПа до 200 ГПа хорошо изучена экспериментально (кривая 1 на рис. 18-10), она приведена в обзоре (Boehler, 2000). Кривая 2 - «конденсация-испарение» железа может быть продолжена в область температур $T > T_c$ (кривая 2-а) и давлений $p > p_k$, если воспользоваться подходом, развитым Зельдовичем и Райзером (1966), где предложено рассматривать вещество, находящееся при pT параметрах, превышающих критические, как смесь индивидуальных веществ, обладающих различной теплоемкостью c_v : $c_v = 3 R_g$ (конденсированное состояние) и $c_v = 3/2 R_g$ (газ), где R_g - газовая постоянная. Если температура вещества $T > T_p$, то оно находится в газообразном состоянии, если меньше ($T < T_p$), то - в конденсированном. К примеру, для железа нормальной плотности, $T_p \approx 20\ 000$ К. При увеличении давления p и сжатии вещества, растет и температура: $T_p \sim p/\rho$ (ρ - плотность). Предельное значение величины T_p , ($T_p \sim U_w/R_g$) железа (Зельдович, Райзер, 1966) оказывается порядка 70 000 К. Таким образом, можно продолжить верхнюю кривую состояния железа в области температур $T_c < T < T_p$ и получить кривую равновесия фаз железа в области температур и давлений, принятых для центра Земли, где $p \approx 360$ ГПа (кривая 2 на рис. 4-10). Надо заметить, что линия плавления вещества мантии Земли (MgO) примерно соответствует линии плавления железа, но шкала температур в этом случае выше на 1000 К. Этим можно воспользоваться при построении кривых равновесия фаз вещества Земли. Принципиальных различий с кривой железа быть не должно.

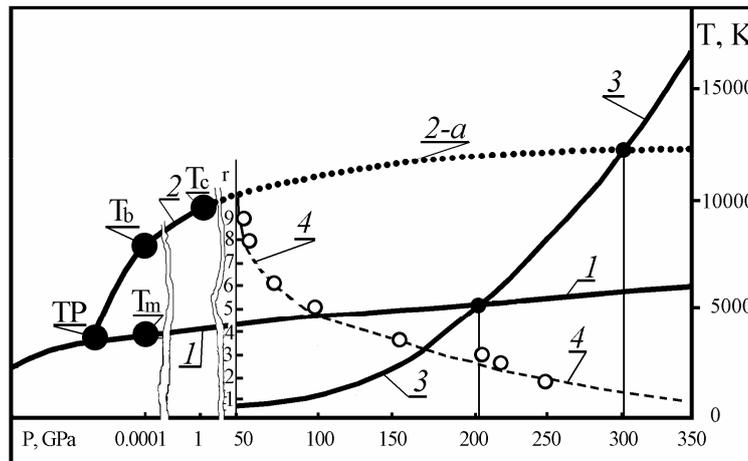


Рис. 4-10. Фазовая диаграмма железа: 1 - линия «плавление – кристаллизация» (Boehler, 2000; 2 - линия «испарение – конденсация», 2-а – продолжение 2 для $T > T_c$. Ударная адиабата 3 - вещества ядра, согласно модели горячей Земли, 4 - зависимости давления в ударной волне от радиуса шара (dp/dr) в сферическом приближении (Зельдович и др., 1995). Температура: T_m - плавления, T_b - кипения, T_c - критическая, TP – тройная точка.

Оценка распределения температуры по глубине Земли представляет достаточно сложную задачу. Дело в том, что известны данные о величине и распределении теплового потока, теплопроводности пород земной коры и температурного градиента, измеренных на очень небольших глубинах. С большей или меньшей правдоподобностью оценивается температура на глубине $h = 100$ км. Известно также давление на этой глубине. Дальнейшие рассуждения относительно хода температурной зависимости по глубине, как правило, находятся в тесной связи с используемой авторами моделью строения Земли и ее химическим составом. Принятый путь оценок dT/dh основан на представлении об

адиабатическом характере распределения температуры в недрах Земли. Зная pT -условия на глубине 100 км и приняв определенный закон, например, адиабату, вычисляют распределение температуры по глубине. Для оценки dT/dh используется выражение адиабаты Пуассона:

$$(pV^\gamma = const, TV^{\gamma-1} = const, c_p/c_v = \gamma); (\partial T/\partial p)_S = T/c_p (\partial V/\partial T)_p, \quad (4.15)$$

которое преобразуется в: dT/dh заменой $dp = -\rho g dh$.

Земля диссипативная система, здесь происходит постоянный рост энтропии. По-видимому, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. Для оценки характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Ударная адиабата имеет существенное отличие от адиабаты Пуассона (реализуемой в идеальном газе с постоянной теплоемкостью, в недиссипативных процессах с постоянной энтропией).

Адиабата Гюгонио зависит от двух параметров, давления и объема в начальном состоянии. Уравнения ударной адиабаты (Зельдович, Райзер, 1966):

$$\varepsilon_1 (p_1 V_1) - \varepsilon_0 (p_0 V_0) = 1/2 (p_1 + p_0) (V_0 - V_1), \quad (4.16)$$

$$\omega_1 - \omega_0 = 1/2 (p_1 - p_0) (V_0 + V_1),$$

$$\varpi = (\varepsilon + pV).$$

Эти уравнения определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны разрыва - "скачка" характеристик среды. Надо заметить, что поверхность разрыва термодинамических характеристик системы (Земли, в нашем случае) часто называют неподвижной ударной волной. Этот факт еще раз подтверждает, что только адиабата Гюгонио может использоваться для оценки характера dT/dh Земли. Подставляя:

$$\varepsilon = c_v T = pV/(\gamma - 1); \varpi = c_p T = \gamma/(\gamma - 1) pV,$$

решаем уравнения относительно температуры T_1 :

$$T_1/T_0 = p_1 V_1 / p_0 V_0.$$

На рис. 4-10 (кривая 3) изображена зависимость dT/dp , построенная по адиабате Гюгонио:

$$dT = -T(\Gamma/V)dV + 1/2 c_v [(V_0 - V)dp + (p - p_0)dV], \quad (4.17)$$

здесь Γ - коэффициент Грюнайзена. Пересечение адиабаты Гюгонио, с кривыми, соответствующими кривым равновесия фаз железа "отбивают" границы: в первом случае "твердое-жидкость", во втором - "жидкость-газ".

Применение ударной адиабаты Гюгонио для оценки распределения dT/dh предполагает, что Земля образовалась путем очень быстрого процесса самогравитации вещества Земли, при котором основную роль играли ударные процессы сжатия, сопровождающиеся возникновением ударных волн и фазовых границ. Земля при таком процессе образования оказывается достаточно горячей.

В задаче исследования степени соответствия свойств железа и вещества ядра Земли широко используется величина коэффициента Пуассона σ .

$$\sigma = 1/2 (3K - 2\mu) / (3K + \mu) = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2 (V_p^2 + V_s^2). \quad (4.18)$$

Причем, если напряжения σ_{xx} и σ_{yy} - однозначно связаны с сжимающей силой p :

$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p \sigma / (1 - \sigma)$, то коэффициент Пуассона не должен зависеть от величины давления.

В работе (Кулиев, 2000), посвященной определению коэффициента Пуассона в напряженных средах, утверждается, что величина коэффициента Пуассона должна быть постоянной для рассматриваемого материала и независимой от величины действующих внешних нагрузок. С другой стороны, Falzone и Stacey (1980) полагали, что давление

оказывает весьма заметное влияние на коэффициент Пуассона, причем, настолько, что железо может иметь его равным 0.445. Экспериментальное исследование упругости и реологии железа вплоть до давления в 220 ГПа путем сжатия образца в алмазной наковальне (Mao et al., 1998) показало, что скорости P и S волн равномерно увеличиваются с ростом давления таким образом, что коэффициент Пуассона остается постоянным вплоть до 200 ГПа и, по аппроксимации авторов (Mao et al., 1998), должен оставаться таким вплоть до давления, характерного для центра Земли (линия 2 на рис. 4-11). Эта линия практически совпадает с линией 1, показывающей ход коэффициента Пуассона в мантии Земли, и в целом по Земле, где величина σ равна 0.5 во внешнем ядре, и $\sigma = 0.45$ - во внутреннем. Величина коэффициента Пуассона ($\sigma = 0.45$ - во внутреннем ядре) была оценена ранее на основании использования уравнения Адамса и Вильямсона:

Авторы (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000) попытались объяснить слишком высокое значение коэффициента Пуассона ($\sigma = 0.45$) нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без привлечения идеи частичного плавления железа из-за громадного давления в центре Земли, что находится в противоречии с экспериментом (Mao et al., 1998).

Оценки величины коэффициента Пуассона были выполнены в экспериментах по ударному сжатию железа (Brawn, McQueen, 1986). Оказалось, что эти данные находятся в противоречии как с данными коэффициента Пуассона Земли, так и статически сжатого железа (см. кривая 3 на нижней панели рис.1-11). Изломанная линия 3 получена путем пересчета данных (Brawn, McQueen, 1986), приведенных авторами для зависимости коэффициента Пуассона от плотности железа, а так же с учетом данных (Steine-Neumann et al., 2001).

Анализ известных данных экспериментов и расчетов характеристик вещества внутреннего ядра и кристаллического гексагонально упакованного железа однозначно показывает, что внутреннее ядро не может состоять из кристаллического железа. Однако, с другой стороны, утверждать, что ядро Земли не может быть железным (с примесями, или без них) так же нет достаточных оснований. Кроме этого, необходимо учесть неоспоримый факт, что внутреннее ядро твердое и оно, возможно, имеет гексагональную упаковку. Более того, если согласиться с точкой зрения на то, каким образом образовалась Земля и допустить, что она сформировалась за счет механизма быстрой самогравитации, то, похоже, вообще в этой ситуации нельзя найти приемлемое решение. Следует учесть, что согласно модели горячей Земли вещество внутреннего ядра находится в газообразном состоянии, вернее, представляет собой плотную слабо ионизованную плазму. Как это ни кажется парадоксальным, именно в том, что внутреннее ядро Земли представляет собой плазму, находится объяснение всем приведенным нами парадоксам. Остается главный вопрос: как же так, твердое ядро состоит из плотной плазмы? Однако в физике плазмы это не является невозможным. Известно, что плотная астрофизическая плазма (Van Horn, 1991) обладает квантовыми свойствами, представляет собой Вигнеровский кристалл (Wigner, 1934), который, как известно, сдвиговые волны пропускает. Более того, в самое последнее время в физике плазмы обнаружено и интенсивно изучается явление, названное пылевой кристаллической плазмой. Экспериментально обнаружено, что такое вещество обладает гексагональной кристаллической структурой, в таком веществе распространяется «пылевой» звук (Maddox, 1994; Thomas et al., 1994; Thomas, Morfill, 1996). Как было обнаружено совсем недавно, в пылевой кристаллической плазме распространяется сдвиговая волна. Этот факт, по-видимому, можно считать подтверждением правомерности нашей модели.

4. 7. Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной.

Рассмотрим результаты экспериментов по нагружению сферической ударной волной стального шара (Зедьдович и др., 1995). Стальной шар диаметром 40 мм был

окрыжен слоем взрывчатого вещества толщиной 20 мм. При подрыве взрывчатого вещества на шар воздействует сферическая ударная волна. По мнению авторов, ударная волна вызывает испарение центральной части шара диаметром около 5 мм, плавление в узкой области толщиной около 1 мм, а так же вязкое течение и наклеп во внешней части шара. На фотографии центральной части разрезанного образца (рис. 4-11) можно выделить три области. Центральная, почти сферическая полость, в которой вещество в момент эксперимента находилось в газообразном состоянии, представляет собой гомогенную структуру. Вокруг неё находится полость, содержащая вещество, прошедшее стадию плавления, последующей кристаллизации и образования дендритной структуры. Внешняя полость шара так же как его центральная часть, гомогенны, но в отличие от центральной части, она вся пронизана радиальными «следами», напоминающими прорывы жидкого вещества в направлении в поверхности шара. Вся картина, изображенная на срезе стального образца, весьма напоминает внутреннее устройство Земли, если, к примеру, обратиться к «японской» модели глобальной геодинамики (Лобковский, Котелкин, 2000), с центральным внутренним ядром, внешним – жидким и мантией, пронизанной следами от всплывающих плюмов.

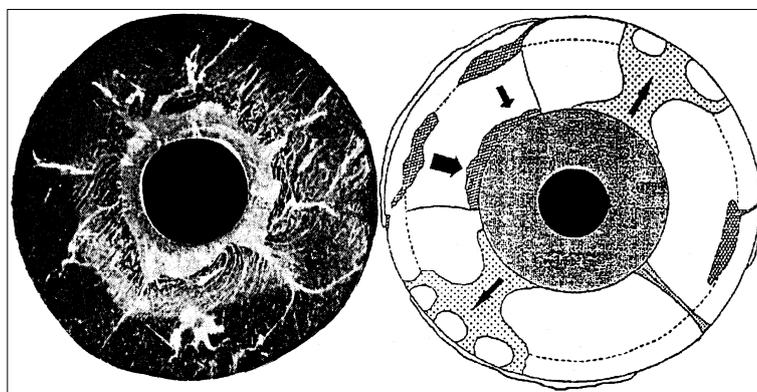


Рис. 4-11. Фотография разреза центральной части железного шара после нагружения ударной волной (Зельдович и др., 1995) - слева; справа - схема внутреннего устройства и глобальной геодинамики Земли (Лобковский, Котелкин, 2000).

Авторы измерили распределение микротвердости H_{μ} стального шара от расстояния r и давления p до центра (рис. 4-12-а). Твердость стали до нагружения, равна 220 кг/мм^2 . После нагружения шара ударной волной, она увеличилась до $300 - 400 \text{ кг/мм}^2$. Измерений скорости звука ни в момент нагружения шара, ни после релаксации его вещества, не проводилось. Хотя, казалось бы, знание распределения скоростей звука по радиусу шара могло бы либо подтвердить, либо опровергнуть аналогию между железным шаром и Землей.

Для того чтобы перейти от известных данных распределения микротвердости к картине распределения скоростей акустических волн по радиусу шара можно построить (возможно, не совсем корректно) зависимость: $V \sim (H_{\mu})^{1/2}$ (рис. 4-12-б). Ниже, для сравнения, приведено распределение скоростей P волн в нижней мантии и ядре Земли в трактовке Джеффриса (1960) (рис. 4 -12-с). Рисунки 12-б и 12-с имеют общность, что может служить формальным подтверждением правомерности аналогии между стальным шаром, после нагружения его ударной волной, и внутренним строением Земли.

Совпадение рисунков 4-12-б и 4-12-с, по-видимому, не случайно. Наличие довольно резких изменений величины H_{μ} вдоль радиуса шара говорит об изменении фазового состояния вещества в момент нагружения. По-видимому, похожая картина происходит и на Земле, где резкие изменения скоростей сейсмических волн показывают изменение состояния фаз его вещества. Легко показать, что энергии взрывчатого

вещества, используемого в обсуждаемом нами эксперименте, недостаточно для того, чтобы полностью испарить все вещество стального шара (массой $M_{ш}$). Для этого необходима масса взрывчатого вещества $M_{вв} \approx 2 M_{ш} U_u / E_{вв}$, где: $E_{вв}$ – эффективность взрывчатого вещества ($E_{вв} \approx 4$ кДж/г), а коэффициент 2 следует из критерия полного испарения, применение которого было обосновано в (Зельдович, Райзер, 1966). По-видимому, этот коэффициент должен быть ещё больше, так как мы не учитываем того, какая часть энергии взрывчатого вещества будет использоваться на создание ударной волны. Тем не менее, величина $M_{вв}$ оказывается порядка одного кг, в то время как в эксперименте применялось около 300 г.

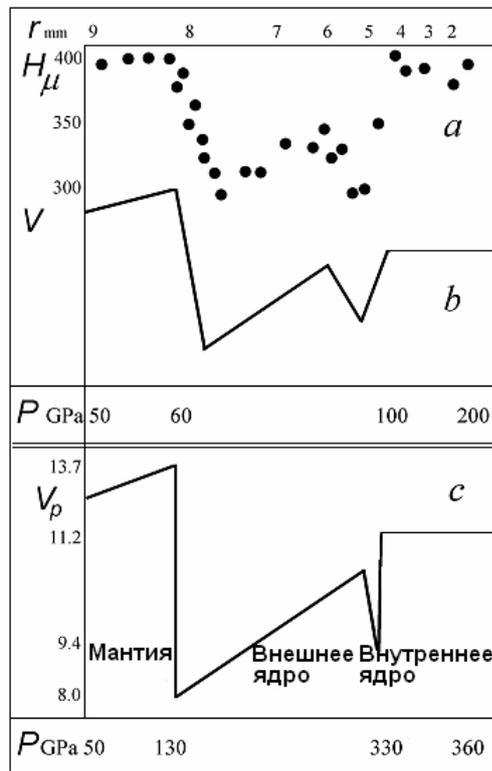


Рис. 4-12. **a** - зависимость микротвердости H_{μ} стального шара от радиуса r и давления p в сферической сходящейся ударной волне (по данным Зельдович и др, 1995); **b** - зависимость скорости акустических волн (в отн. ед.): $v \sim (H_{\mu})^{1/2}$ от величины давления в ударной волне; **c** - скорость P волн от давления в нижней мантии и ядре Земли (по Джеффрису, 1960).

Обсуждение экспериментальных данных. Предположим, что Земля состоит исключительно из железа. Сколько энергии ВВ потребуется для того, чтобы полностью испарить вещество Земли? Подставляем вместо $M_{ш}$ массу Земли ($6 \cdot 10^{27}$ г) и получаем величину необходимой энергии, равной примерно 10^{39} эрг. Для сравнения, гравитационная энергия Земли: $E = 3/5 \cdot GM^2/R = 2 \cdot 10^{39}$ эрг, здесь: G – гравитационная постоянная, R – радиус Земли. Использование коэффициента $3/5$ вместо $1/2$, следующего из теоремы вириала, обосновано Магницким (1965). Таким образом, гравитационной энергии Земли вполне достаточно для того, чтобы полностью испарить её вещество. Естественно, это может произойти при условии, что процесс образования Земли шел настолько быстро, что энергия, выделяемая при сжатии её вещества, не успевала излучиться в космос. Условием быстрого сжатия вещества Земли может быть, например, превышение скорости сжатия $(GM/R)^{1/2}$ над скоростью звука $(\gamma RT/\mu)^{1/2}$, где μ - атомный вес вещества Земли (критерий Джинса). При выполнении такого условия процесс

образования Земли должен соответствовать ударному сжатию её вещества, а распределение температуры по радиусу Земли - соответствовать адиабате Гюгонио.

Вернемся к рис. 4-10, где приведено распределение температуры Земли (кривая 3) от давления, рассчитанное по адиабате Гюгонио, а так же кривые плавления (кривая 1) и испарения (кривая 2) железа. Пересечение кривой Гюгонио с линиями уравнения состояния железа, маркируют начало плавления железа на границе внешнего ядра и мантии и испарения его – на границе внутреннего ядра. Результаты ударных экспериментов (Brown, McQueen, 1986) соответствуют температурам железа, большим, чем температура плавления при заданном давлении (Boehler, 2000). Многие из авторов этих экспериментов приходят к выводу относительно того, что железо в них находится в каком то необычном (β) состоянии. Авторы не делали попытки оценить температуру железа в этом эксперименте, по их мнению, часть вещества шара испарилась, а другая – расплавилась, остальная оставалась твердой. Это дает основание считать, что интервал температур в этом эксперименте был достаточно велик и мог пересекать линии «твердое - жидкость» и «жидкость-пар». Возможно, и в других ударных экспериментах интервал значений температур был заметно выше, чем авторы приводят в своих работах. При таком подходе, особое состояние железа, которое многими авторами называется как β -Fe, возможно, представляет собой двухфазную (жидкость + пар) среду, или даже трехфазную (твердое + жидкость + пар) среду. Рассматриваемый нами эксперимент с нагружением стального шара, это, вероятно, именно такой случай.

Все ударные эксперименты имели целью перевести железо в состояние расплава. Этой же цели преследовали эксперименты по лазерному нагреву образцов (Boehler, 2000), находящихся в алмазной наковальне при очень высоких давлениях. Нагревая эти образцы, экспериментаторы стремились воспроизвести явление плавления железа при давлении, равном давлению на границе ядра с мантией. В этих экспериментах негласно предполагалась идея, что Земля состоит только из железа.

Физика явлений, происходящих при pT параметрах вещества и, в частности, железа, при которых p примерно равно давлению в центре Земли, а температура T составляет несколько эВ (10000 – 30000 К) очень сложна, т.к. здесь могут сосуществовать кристаллическая и жидкая фазы вещества, а так же вещество в состоянии неидеальной сжатой плазмы или слабо ионизированного газа (Зельдович, Райзер, 1966). При дальнейшем увеличении давления и температуры, железо будет существовать – только в жидкой и плазменной фазе (Альтшулер и др. 1999). По всей видимости, результаты ударных экспериментов с железом в области давлений 100 – 400 ГПа (Brown, McQueen, 1986) по оценке величины коэффициента Пуассона, показывают, что вещество не было полностью расплавлено. Вполне возможно, что в этих экспериментах часть вещества находилась так же и в состоянии пара. Об этом свидетельствуют следы напыления вещества ударника и мишени на элементах конструкции после проведения эксперимента. Надо заметить, что оценить температуру вещества в ударных экспериментах не всегда можно в достаточной степени корректно. Само понятие температуры, когда вещество находится в метастабильном состоянии не вполне оправдано. Если учесть, что время ударного эксперимента составляет примерно 10^{-6} сек, толщина образца $x = 0.1$ см, а коэффициент температуропроводности $\zeta = 10^{-2}$ (см²/с), то время выравнивания температуры $t = x^2 / \zeta$ порядка секунды, что значительно больше времени эксперимента. Это означает, что температура не может быть равновесной по всей толщине образца. Если сделать аналогичные оценки для Земли, то оказывается, что время релаксации её вещества t может достигать 10^{10} - 10^{12} лет, что значительно превышает возраст Земли. Эта оценка показывает, что *вещество Земли полностью не релаксировало.*

4. 8. Упругие свойства кристаллической пылевой плазмы.

В последние годы, начиная с выхода работы (Thomas et al., 1994) внимание многих исследователей привлекает экспериментально обнаруженное необычное состояние

вещества, названное пылевой кристаллической плазмой, или плазма - кристаллом. Кристаллическая плазма образуется при искусственном или естественном введении в область газового разряда пылевых частиц, которые обычно приобретают отрицательный заряд (Z) равный нескольким сотням зарядов электрона, и, выстраиваясь на равных дистанциях друг от друга, - создают гексагональную кристаллическую структуру. Размер пылинки варьируется от долей микрона до десяти и более микрон, а расстояние между ними составляет несколько сотен микрон (Melzer et al., 1994).

Заметим, что пылевая кристаллическая плазма (ПКП) не является каким-то особым экзотическим состоянием вещества. Считается, например, что она может присутствовать в лабораторных установках, предназначенных для исследования реакции термоядерного синтеза. Здесь ПКП может образоваться в результате воздействия высокотемпературной плазмы на стенки термоядерных устройств (Winter, 2000) и, возможно, оказывать влияние на их работу. Принято считать, что ПКП присутствует в космосе и, к примеру, является одним из главных компонентов пылевых туманностей и планетарных колец (Цытович, 1997). Обнаружено присутствие пылевых частиц в непосредственной близости от Солнца, что может говорить об их относительной устойчивости (Гуляев, Щеглов, 2001). Пылевые частицы и ПКП возникают и оказывают влияние в ряде технологических операций, например, в операции травления - при производстве устройств микроэлектроники (Цытович, 1997) и т.п. Изучению свойств ПКП посвящено большое количество работ (Lampe et al., 2000; Игнатов, 2001; Merlino et al., 1998; Chu, Lin, 1994; Thomas, Morfill, 1996; Melzer, et al., 1994; Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000). Проводятся специальные конференции, вышли в свет несколько монографий (см. ссылки в (Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000)) и обстоятельных обзоров (Цытович, 1997). Тем не менее, среди известных публикаций нет ни одной работы, в которой бы обсуждался вопрос, насколько ПКП действительно «твердая» и подобна «кристаллу». Этот вопрос можно сформулировать иначе - обладает ли вещество в таком состоянии свойствами, присущими упругим твердым телам? Если бы удалось однозначно ответить на этот вопрос, то, возможно, это бы открыло путь для объяснения ряда свойств вещества, находящегося в ядрах звезд, коричневых карликов и планет. Очевидно, что решение этой проблемы служило бы подтверждением правомерности модели горячей Земли.

Многочисленные попытки создать теорию, или хотя бы непротиворечивую модель ПКП, пока не привели к положительному результату. Основной ключевой вопрос состоит в том, что не находится правдоподобной силы, которая приводила бы к взаимному притяжению частиц пыли, обладающих зарядом одной полярности. Причем, эта сила должна быть не меньше кулоновской силы расталкивания $f_e = Ze^2/R^2$. Здесь e – заряд электрона, R – расстояние между пылинками. Пылинки находятся в плазме, которая, экранируя действие кулоновских сил, уменьшает их в k - раз: $k = \exp(-R/\lambda)$, где $\lambda = (kT/4\pi ne^2)^{1/2}$ - дебаевский радиус экранирования, а n – концентрация плазмы. Физики, в «противовес» силам кулоновского расталкивания, привлекают «теневые» (shadowing) силы, якобы возникающие при экранировании пылинками потоков плазмы (Lampe et al., 2000; Игнатов, 1998), аналогично тому, как это было предсказано 200 лет тому назад Лесажем, который пытался создать теорию гравитации на эффекте экранирования гравитирующими телами потока эфира. Идея, согласно которой притяжение между пылевыми частицами возникает за счет экранирования ими потоков плазмы возможно правильная, однако пока она не имеет экспериментального подтверждения. Более того, это объяснение годится только в случае лабораторных экспериментов. В природе экранирующие потоки плазмы находятся далеко не во всех случаях. Например, таким случаем можно считать и внутреннее ядро Земли.

Обратимся к сравнительно малоизвестному эксперименту, в котором исследовались силы притяжения между макротелами. Речь пойдет об эффекте притяжения

между телами, который предсказал Казимир ещё в 1948 г. Эффект, получивший его имя, был многократно экспериментально реализован в различных научных центрах (Лифшиц, 1954; Лифшиц, 1955; Мостепаненко, Трунов, 1990; Дерягин, 1985; Lamoreaux 1997; и др.). Обнаруженная экспериментально сила стала называться силой Казимира. Суть эффекта Казимира состоит в том, что на единицу площади двух проводящих металлических (в пределе идеальной проводимости) плоскопараллельных пластин, расположенных в вакууме на расстоянии R друг от друга должна действовать сила притяжения $f_C = -(\pi^2/240) \cdot (hc/R^2)$, где h – постоянная Планка, c – скорость света. Эта сила уникальна, т.к. она не зависит ни от масс, ни от зарядов, ни от каких-либо иных констант связи.

Первым теорию эффекта, как теорию молекулярных сил притяжения между конденсированными телами с учетом влияния температуры на эти силы, разработал Лифшиц (1954, 1955) ещё до того, как эффект получил свое название. Затем причина появления силы Казимира стала интерпретироваться как изменение спектра нулевых колебаний электромагнитного вакуума из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электромагнитного поля на пластинах. К настоящему времени исследована лишь та разновидность сил Казимира, которая связана с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, и по существу совпадает с запаздывающими силами Ван-дер-Ваальса (Мостепаненко, Трунов, 1990).

На начальной стадии экспериментов было обнаружено, как это и предсказывал Казимир, притяжение между металлическими пластинами в вакууме. В последствии экспериментаторы стали испытывать притяжение между различными объектами. В частности, этот эффект экспериментально наблюдался не только в глубоком вакууме, и не при очень низкой температуре, и не между металлами, а и в других возможных ситуациях, в частности, между диэлектриками различной формы (Дерягин и др., 1985). Экспериментально исследованы далеко не все возможные ситуации и способы измерения силы Казимира. Эти исследования продолжаются в различных научных центрах (Lamoreaux, 1997; Mohideen, Roy, 1998).

В нашей модели, при оценке величины упругости ПКП, в качестве потенциала, приводящего к притяжению пылинок друг к другу, т.е. потенциала, противодействующего кулоновскому расталкиванию, будем пользоваться силой Казимира f_C . Зная потенциал взаимодействия пылинок, можно оценить сжимаемость системы пылинок в плазме и, таким образом, оценить величину упругих свойств ПКП. Для оценки упругости ПКП воспользуемся подходом (Михайлов и др., 1964), развитым для вычисления скорости звука в ионных кристаллах. Энергия «кристаллической решетки» ПКП: $U = N\varphi$, где N – число пар пылевых частиц, а φ – потенциал. Здесь стоит N , а не $2N$, поскольку при расчете полной энергии решетки кристалла U , считается каждая взаимодействующая пара только один раз.

Потенциал кристаллической решетки можно выразить: $\varphi = \sum \varphi_{ij}$, где φ_{ij} – сумма потенциала сил кулоновского отталкивания и потенциала сил Казимира f_C , отвечающего за притяжение пылевых частиц: $\varphi_{ij} = f_C/R_{ij}^n - e^2/R_{ij}$. Подставляя известные значения величин, потенциал ПКП:

$$\varphi = \pi^2 hcS/240R^3 - [(Ze)^2/R] \exp(-R/\lambda). \quad (4.19)$$

Выразим сжимаемость ПКП ($1/\beta$) через вторую производную от энергии по объёму:

$$1/\beta = V d^2 U/dV^2 = V [dU/dR \cdot d^2 R/dV^2 + d^2 U/dR (dR/dV)^2]. \quad (4.20)$$

Учитывая то, что в большинстве экспериментальных исследований ПКП утверждается, что в плазме газового разряда возникает гексагональная кристаллическая структура, объем ячейки можно выразить: $V \approx 3N R^3$. В состоянии равновесия ПКП: $dU/dR = 0$. Учитывая, что $(dR/dV)^2 = 1/81 N^2 R^4$, и подставляя значение φ , получаем:

$$U = N[\pi^2 hcS/240R^3 - [(Ze)^2/R] \exp(-R/\lambda)],$$

и, отсюда:

$$d^2 U/dR^2 = N [12\pi^2 hcS/240R^5 - [2(Ze)^2/R^3] \exp(-R/\lambda)]. \quad (4.21)$$

Учитывая условие равновесия, выразим параметр $\exp(-R/\lambda)$:

$$\begin{aligned} dU/dR &= N[-3\pi^2 hcS/240R^4 + [(Ze)^2/R^2] \exp(-R/\lambda)] = 0, \\ \exp(-R/\lambda) &= \pi^2 hcS/80R^2 (Ze)^2. \end{aligned}$$

подставляя, получаем выражение второй производной от энергии по объему

$$d^2U/dR^2 = N[\pi^2 hcS/40R^5],$$

тогда сжимаемость ПКП равна:

$$1/\beta \approx 10^{-3} \pi^2 hcS/R^6. \quad (4.22)$$

Оценим применимость полученной формулы. Легко показать, что условие $f_c = f_e$ выполняется при: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow 1$, что не всегда соответствует большинству современных экспериментов с пылевой плазмой, в которых наблюдается: $R \approx \lambda \gg (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow \infty$, но, тем не менее, как будет показано ниже, полученная формула сжимаемости может быть использована в случаях плотной плазмы.

Сравним полученную нами формулу сжимаемости пылевой плазмы, с аналогичной формулой сжимаемости $(1/\beta)$ металлов (Михайлов и др., 1964): $1/\beta = A(Ze)^2/18 R^4$, где A - постоянная Маделунга. Заменяем в нашей формуле $hc = e^2/\alpha$, здесь α - постоянная тонкой структуры, которая характеризует электромагнитное взаимодействие ($\alpha = 1/137$), и получим: $1/\beta \approx \pi^2 (Ze)^2/10^3 \alpha R^4$ (полагая $S \approx R^2$), получаем качественное совпадение нашего результата с известной формулой сжимаемости металлов.

О величине модулей упругости можно судить по величине скоростей продольных и сдвиговых волн в упругой среде и анизотропии этих скоростей. Распространение волн в кристаллической среде описывается законом Гука, согласно которому выполняется соотношение между создаваемым напряжением T и возникшими в среде деформациями S : $T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}$, где $C_{ijkl} = (\partial T/\partial S)$ - тензор модулей упругости. Тензор модулей упругости гексагональной кристаллической структуры:

$$\begin{array}{cccccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{array}$$

Скорости продольных V_P и сдвиговых V_S волн гексагональной структуры равны соответственно: для волн, распространяющихся вдоль оси Z : $V'_P = (C_{33}/\rho)^{1/2}$, $V'_S = (C_{44}/\rho)^{1/2}$ и распространяющихся поперек оси Z : $V''_P = (C_{11}/\rho)^{1/2}$, $V''_S = ((C_{11} - C_{12})/2\rho)^{1/2}$.

Для гексагональной структуры модуль объемного сжатия $1/\beta (K)$ можно выразить через модули упругости (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/\beta = K = [(C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2)/C_S], \text{ где } C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}.$$

Эти формулы позволяют вычислить модули упругости гексагональной кристаллической структуры, к которой относят и КПК.

В эксперименте (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) измерены скорости V'_P и V'_S . Следовательно, мы могли бы вычислить только модули C_{33} и C_{44} . Однако, учитывая то, что мы рассматривали гексагональную решетку, а в эксперименте (Nosenko et al., 2002) – 2D решетка, эти оценки не совсем правомерны, тем не менее, несомненный интерес представляет сравнение порядка величины модуля сжатия K полученного из эксперимента и оцененного по формуле (4.22).

Сделаем оценку модуля упругости ПКП для типичного эксперимента с пылевой плазмой. При размере пылинки 0.01 мкм ($S = 10^{-12} \text{ см}^2$) и расстоянии между ними $R = 10$ мкм, величина сжимаемости $1/\beta \approx 10^{-12} \text{ дин/см}^2$. Принимая плотность ПКП равной 10^{-4} г/см^3 , скорость звука в плазме оказывается порядка 10^{-4} см/с . Много это или мало? В (Цитович, 1997) утверждается, что скорость пылевого звука обычно на много порядков меньше скорости обычного звука, однако - на сколько порядков эта скорость меньше скорости «пылевого звука» пока не оценено.

Эксперимент (Merlino et al., 1998) показывает, что в ПКП распространяются акустические (возможно, пылевые) волны, скорость которых около 10 см/с. Эта скорость больше, чем оцененная нами скорость на пять порядков. Однако сравнивать эти скорости не совсем правомерно т.к. в этом эксперименте размер частиц составлял 0.7 микрон, расстояние между ними ≈ 50 микрон, а газовый разряд помещен в продольное магнитное поле ≈ 100 Гаусс.

Есть основания считать, что результаты экспериментов с пылевой плазмой, полученные в (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) прямо свидетельствуют о наличии упругих свойств пылевой плазмы. Условия проведения экспериментов: $R \approx \lambda \approx 0.8 \text{ мм}$; $Q = Z e \approx 10000 e$; масса пылинки $m = 5 \cdot 10^{-10} \text{ г}$; диаметр 8.7 микрон. Авторы измерили скорости волн сжатия и сдвига в пылевой лабораторной плазме: $C_L = 24.2 \pm 1.7 \text{ мм/с}$ и $C_T = 5.4 \pm 0.5 \text{ мм/с}$. Переводя используемые авторами обозначения скоростей на общепринятый в сейсмологии язык: $V_P = C_L$; $V_S = C_T$, $x = V_P/V_S = C_L/C_T$, оценим величину коэффициента Пуассона:

$$\sigma = (V_P^2 - 2 V_S^2)/2 (V_P^2 - V_S^2) = (x^2 - 2)/2(x^2 - 1).$$

Получаем: $x = 4.48$ и $\sigma = 0.47$. Напомним, что $\sigma = 0.28$ для железа, 0.5 – жидкости, 0.48 – резины, 0.45 – вещества внутреннего ядра.

Зная величины скоростей V_P , V_S и плотности плазмы ρ ($\rho \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$), можно оценить модуль сжатия $1/\beta$: $K = 1/\beta \approx V_P^2 \cdot \rho \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2$ и модуль сдвига: $\mu \approx V_S^2 \cdot \rho \approx 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ дин/см}^2$.

Для сравнения, оценим K по формуле (4.22), полагая: $Z \approx 10000$, $e \approx 4.8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$, $(Ze)^2 \approx 2 \cdot 10^{-11}$, $R = 0.08 \text{ см}$. Величина $K = 1/\beta \approx 10^{-6} \text{ дин/см}^2$.

Как видно, K из эксперимента, и K , полученный по формуле (4.22), по порядку величины совпадают. Здесь предполагалось выполнение условия $S \approx R^2$. Эти расчеты позволяют оценить порядок величины K для вещества внутреннего ядра, или, точнее, полагая, что $K = 1/\beta \approx 10^{12} \text{ дин/см}^2$, оценить характерные размеры R элементарной кристаллической ячейки (аналога пылевой частицы). Предполагая, что формула (4.22) справедлива и в области мегабарных давлений, характерный размер R можно оценить приближенно таким образом:

$$K \approx 10^{-3} \pi^2 \hbar c S / R^6, \text{ учитывая } S \approx R^2, \text{ получаем: } K \sim 1/R^4.$$

Полагая характерный размер «пылинки» кристаллической лабораторной плазмы R порядка 100 микрон, при увеличении K в 10^{18} раз, характерный размер «пылинки» - элементарной кристаллической ячейки «кристаллического вещества» внутреннего ядра будет составлять примерно 3 Å. (Очевидно, что это очень грубая оценка, определяющая только порядок величин. Тем не менее, она показывает принципиальную возможность существования «твердого, кристаллического» вещества, состоящего из слабо ионизованной плазмы, сжатой мегабарным давлением. Обычную плазму принято считать четвертым состоянием вещества. По-видимому, плотную, кристаллическую, пылевую плазму, возможно, следует выделить в особое, пятое состояние).

В ряде работ по кристаллической плазме авторы утверждают, что в плазме образуется кристалл Юкавы - Yukawa crystal (Hamaguchi, Farouki, 1994; Farouki, Hamaguchi, 1994; Ohta, Hamaguchi, 2000; Pramanik et al., 2002; Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002). В теории используется потенциал типа потенциала Юкавы:

$$\varphi \sim 1/R \exp(-R/\lambda_B), \quad (4.23)$$

где λ_B - (как и в нашей работе) дебаевский радиус экранирования. В потенциале Юкавы λ_B - это комптоновская длина волны промежуточного (виртуального) бозона. Для миллиметровой области действия, примерно соответствующей нашей модели, масса бозона с $\lambda_B \sim 1$ мм, $m_B \leq 10^{-4}$ эВ/с². Если использование потенциала Юкавы правомерно в нашей модели, то это позволяет конкретизировать механизм взаимодействия между частицами типа Казимира путем обмена между пылинками массовыми бозонами. Сила Юкавы, так же как и сила Казимира, способна обеспечить притяжение частиц, расталкивающихся под влиянием кулоновских сил.

Реализация экспериментов с пылевой кристаллической плазмой в области больших мегабарных давлений и плотностей, позволила бы по-новому взглянуть на существующие в настоящее время представления о физике плазмы, и о физике кристаллического состояния вещества. Осуществление таких экспериментов дало бы новый стимул в изучении физических свойств вероятных компонентов и состояния вещества ядра Земли, а также, возможно, в понимании природы шаровой молнии (Кузнецов, 2004).

Как отмечалось, формула (4.22) для оценки упругости пылевой плазмы применима при выполнении условия: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow 1$. Это условие ближе всего соответствует соотношениям, характерным для шаровой молнии, где вместо пылинок рассматриваются капли воды, размер которых < 1 мкм, а расстояние между каплями $R \approx 5$ мкм. Величина не скомпенсированного электрического заряда капли (Z) не известна, но она не должна быть очень большой. Для плазмы шаровой молнии можно применить нашу формулу, если величина Z порядка нескольких единиц. Если предположить, что поверхностное натяжение шаровой молнии (α_S) обязано наличию силы Казимира, то можно оценить эту величину: $\alpha_S = f_c/r$, r - радиус шаровой молнии. Подстановка известных констант, величин S , R , и $r = 5$ см, дает величину $\alpha_S \approx 10^{-5}$ дин/см (α_S воды 70 дин/см).

Условие: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow 1$ выполняется и для астрофизической плазмы (Van Horn, 1991), упругие свойства которой, вполне возможно, определяются силами Казимира. Если в астрофизической плазме $R \approx 10^{-8}$ см (1 Å), то её плотность и упругие свойства будут близки к аналогичным величинам, характерным для металлов.

4. 9. «Кристаллическая» ячейка вещества внутреннего ядра Земли.

Внутреннее ядро, согласно общепринятой модели холодной Земли, представляет собой твердое кристаллическое железо, которое образовалось внутри расплава железа. Как мы показали выше, эта модель при ближайшем рассмотрении оказывается несостоятельной. В нашей, альтернативной модели вещество внутреннего ядра находится в состоянии плотного газа (пара, плазмы). По данным о прохождении сейсмических скоростей это «твердое и кристаллическое» вещество, обладающее гексагональной структурой. Кроме этого, внутреннее ядро обладает анизотропией: скорость продольных волн вдоль оси вращения во внутреннем ядре примерно на 1-2 % больше чем скорость волн, проходящих в плоскости экватора. Мы пришли к выводу, что оказывается можно соединить в единое целое два таких противоречивых свойства, как гексагональная структура и состояние плазмы. Остается выяснить, что это за «кристалл», который существует при давлении 3.6 Мбар, температуре «газа» порядка 3 эВ, и «молекулярный» вес его $\mu \approx 10$. Мы уже отмечали, что $\mu \approx 10$ может быть получен, если вещество состоит из железа ($\mu \approx 56$) и водорода ($\mu \approx 1$) в пропорции: один атом железа на 5 атомов водорода.

В модели горячей Земли постулируется, что Земля (как и другие планеты) образовалась в едином процессе формирования звезды – Солнца. Состав вещества прото Земли в момент её образования идентичен составу вещества Солнца. В процессе образования Земля потеряла практически весь водород, в то время как более тяжелые элементы остались в её составе. При оценке относительной концентрации атомов в веществе, из которого состоит Солнце, за единицу принята концентрация водорода $N = 10^{12}$ частиц.

Полагая, что гелий является продуктом термоядерного синтеза, происходящего на Солнце, его не может быть в ядре Земли, учитывать в дальнейшем гелий не будем. Примем, что железо «традиционно» присутствует в ядре, а элементы, относительная концентрация которых меньше чем у железа (Na, Al, K, Ca) – исключим из рассмотрения. Примем концентрацию железа за единицу, ($N_{Fe} = 1$) тогда относительная (на один атом железа) концентрация других элементов на Солнце (округленно):

- серы: $N = 10^{(7.3-6.6)} = 5$
- магния: $N = 10^{(7.4-6.6)} = 6$
- кремния: $N = 10^{(7.5-6.6)} = 8$
- углерода: $N = 10^{(8.7-6.6)} = 126$
- кислорода: $N = 10^{(9-6.6)} = 250$
- водорода: $N = 10^{(12-6.6)} = 2.5 \cdot 10^5$ (~237 - в ядре Земли)

Согласно нашей модели, концентрация водорода, за счет захвата его Солнцем, как более легкого, уменьшилась в момент образования Земли примерно на 3-4 порядка (см. в сл. разделе), в то время как относительная концентрация других элементов оставалась неизменной. При выполнении этого условия можно оценить концентрацию более тяжелых (чем водород) элементов, исходя из того, что средний «молекулярный» вес вещества ядра $\mu \approx 10$. Будем полагать: $\mu = 1/n \sum N_i n_i$, что для Fe + S + Si + Mg; $n = 1 + 5 + 8 + 6 = 20$; $\sum N_i n_i = 1 \cdot 56 + 5 \cdot 32 + 8 \cdot 28 + 6 \cdot 24 = 584$; отсюда получаем μ тяжелого элемента (ТЭ) = $584/20 = 29.2$. Выясним, что представляет собой ТЭ: $\mu (C + O + ТЭ) = \sum N_i n_i = 12 \cdot 126 + 16 \cdot 250 + 19 \cdot 20 = 1512 + 4000 + 380 = 5892$. μ всех элементов без водорода = $5892/396 = 14.9$

Для того чтобы $\mu = 10$, количество атомов водорода ≈ 237 : $\mu \sim (6096 + 237) / (396 + 237) = 6333/633 = 10$ (количество нуклонов, деленное на количество атомов). Если $\mu < 10$, количество атомов водорода, естественно, увеличивается.

Один «кластер» (= 633 атома) обладает общим весом $6333 \cdot 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 10^{-20} \text{ г}$. В см^3 вещества находится $\approx 13 \cdot 10^{20}$, «кластеров», следовательно, один «кластер занимает объем $7.7 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$. На один атом приходится (в среднем) $770/633 = 1.2 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$, т.е. среднее расстояние между атомами составляет около 1 Å.

При температуре ~ 3 эВ степень ионизации (по Саха) не превышает 1 %, принято считать, что это слабоионизованная плазма. Это позволяет нам не учитывать, в первом приближении, коллективные свойства электрического расталкивания плазмы.

При изменении давления от 3.2 до 3.6 Мбар, скорость продольных волн не меняется и остается равной 11.2 км/с, скорость сдвиговых волн = 3.6 км/с, коэффициент Пуассона = 0.45. Упругие модули внутреннего ядра, оцененные по величинам скоростей сейсмических волн в предположении гексагональной структуры внутреннего ядра, приведены в третьей строке таблицы 4.4 (см выше). Напомним, что в первой строке таблицы 4.4 приведены модули железа, измеренные в прямом эксперименте по статическому сжатию монокристалла гексагонального (h.c.p.) железа (Mao et al., 1998), во второй - модули железа, рассчитанные теоретически (Steine-Neumann et al., 2001) по схемам, приведенным в (Steine-Neumann et al., 1999). Очевидно несовпадение данных, приведенных в этой таблице, в которой представлены, для сравнения, реальные модули вещества внутреннего ядра и данные экспериментов и расчетов. Авторы (Steine-Neumann et al., 2001) в своей счетной модели стремились получить совпадение величин коэффициентов Пуассона ($\sigma = 0.45$). В экспериментах (Mao et al., 1998) величина σ железа не меняется в широком диапазоне давлений (до 220 GPa), оставаясь равной 0.28.

В нашем «кластере», как отмечалось выше, 633 атома, из них железо и магний – обладают наименьшим потенциалом ионизации $\approx 7.6 - 7.8$ эВ (см. таблицу 4.5). Степень ионизации – не более 1 %, что составляет 6 - 7 ионов кластера. Таким образом, в «кластере» атомы железа и магния – ионизованы, и саму систему можно рассматривать как ионный кристалл, в котором находятся нейтральные атомы кислорода, водорода, углерода, серы и кремния.

Таблица 4.5

	H	C	O	Mg	Si	S	Fe
E, эВ	13.59	11.26	13.61	7.46	8.15	10.35	7.89

Рассмотрим упрощенный вариант модели. Исключим из состава ядра элементы, обладающие малой концентрацией. Оставим: кислород, углерод и водород, причем, примем, что водорода и кислорода примерно поровну, а углерода – в два раза меньше. Предположим, что именно эти элементы образуют гексагональную решетку, аналогичную описанной в (Jephcoat, Refson, 2001) для h.c.p. железа, как основного компонента ядра Земли. В этой решетке - 17 узлов (см. рис. 4-13). Будем считать, что из них 5 центральных принадлежат водороду (маленькие точки на рисунке). Для выполнения условия: $\mu \approx 10$, необходимо 4 атома углерода (большие кружки) и 8 атомов кислорода (квадраты). Число нуклонов = 171, $\mu = 10.6$. Общий вес решетки: $181 \cdot 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 290 \cdot 10^{-24} \text{ г}$. При плотности внутреннего ядра $\rho = 13 \text{ г/см}^3$, её объем $V = 22 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$. Полагая расстояние между узлами основания решетки равным a , высоту решетки $\approx 1.5 a$, её объем $V \approx 4 a^3$, ($a \approx 1.75 \text{ \AA}$), а высота решетки $\approx 2.6 \text{ \AA}$.

Скорость объемных волн вдоль направлений a и $b = 11.2 \text{ км/с}$, а вдоль высоты (c) - примерно на 1 – 2 % выше (анизотропия ядра). Решетка сжата давлением порядка 3.5 Мбар.

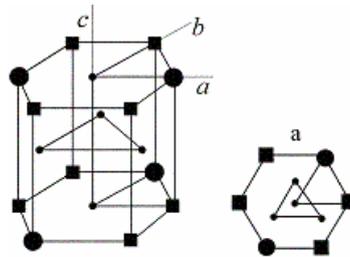


Рис. 4-13. Возможная объемная конфигурация ячейки кристаллической, плазменно-пылевой структуры вещества внутреннего ядра Земли.

Для того чтобы обсуждаемая модель обладала необходимой доказательной силой, требуется в дальнейшем:

- Рассчитать упругие модули кристаллической гексагональной структуры «кластера».
- Сравнить модули и коэффициент Пуассона с реальными параметрами внутреннего ядра. Меняя параметры (например, концентрацию водорода) подобрать наиболее близкие величины модулей.
- Оценить электропроводность такого «кристалла».
- Выяснить, что представляет собой «расплав» такого «кристалла» и можно ли считать, что на его границе реализуется экзотермический фазовый переход - конденсация?

Литература

- Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений. УФН. 1999. Т. 169. № 3. С. 323-344.
- Бай Ши-и. Динамика излучающего газа. М.: Мир. 1968. 323 с.
- Бернал Дж., Фаулер Р. Структура воды и ионных растворов. УФН. Т. 14. Вып. 5. 1934. 586-644.
- Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 535-551.
- Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия. М.: Академия. 2008. 410
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра, 1984, 110 с.
- Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука. 1985. 399 с.

- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение. М.: ИЛ. 1960. 484 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.
- Зельдович В.И., Литвинов Б.В., Пурьгин Н.П. и др. Квазисферическое взрывное нагружение стали с давлением до 200 ГПа. ДАН. 1995. Т. 343. № 5. С. 621-624.
- Игнатов А.М. Квазигравитация в пылевой плазме. УФН. 2001. Т. 171. С. 213-217.
- Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН. 2000. Т. 370. № 4. С. 534-537.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 216 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений Новосибирск: Наука. 1992. 92 с.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли // Геомагнетизм и Аэрономия, 1998-а, Т. 38, С. 166-172.
- Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система // Геология и геофизика, 1998-б, Т. 39, № 7, С. 987-1007.
- Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. Сб. докладов. ИКИР. 2004.
- Кузнецов В.В. Принцип минимизации гравитационной энергии Земли и механизмы его реализации // URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_fgsgms/1-2005/dis-1.pdf 2005.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с
- Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1954. Т. 97. С. 643-646. ДАН.
- Лифшиц Е.М. Влияние температуры на молекулярные силы притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1955. Т. 100. С. 879-881.
- Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухярусная термохимическая модель конвекции в мантии и её геодинамические следствия. В сб. Проблемы глобальной геодинамики. М.: Геос. 2000. С. 29-53.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
- Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра. 1983. 143 с.
- Мёрнер Н.А. Эвстазия, изменение геоида и взаимодействия многих геофизических факторов. Сб. Катастрофы и история Земли. М.: Москва. 1986. С. 394-412.
- Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики М.: Наука. 1964. 514 с.
- Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения. М.: Энергоатомиздат. 1990. 215 с.
- Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.
- Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли, 2003, № 1, С. 53-56.
- Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.- Ижевск: РХД. 2001.
- Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.
- Сакс В.Н. Климаты прошлого на севере СССР. Природа. 1947. №12. С. 19-32.
- Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра. 1982. 460 с.
- Скрипов В.П. Файзулин М.З. Вязкость жидкостей на линии плавления и в переохлажденном состоянии. ДАН. 2001. Т. 378. С. 620-623.
- Физическая энциклопедия (ФЭ) т. 3. М.: БРЭ. 1992. с.78-81.
- Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля: введение в общую геологию. Ч. 2. М.: Мир. 1974. 845 с.
- Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир, 1985. 140 с
- Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы и облака. УФН. 1997. Т. 167. С. 57-99.

- 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. P. 7485-7494.
- Boehler R. High-pressure experiments and phase diagram of lower mantle and core materials. *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. N. 2. P. 221-245.
- Carey S.W. *The expanding Earth*. Amsterdam: Elsevier, 1976, 488 p.
- Chu J.H., Lin I. Coulomb lattice in weakly ionized colloidal plasma. *Physica A*. 1994. V. 205. P. 183-190.
- Chandrasekhar S. *Hydrodynamics and hydromagnetic stability*. Oxford: Clarendon Press. 1961. 654 p.
- Deleuil D. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission Xx. CoRoT-20-b: A very high density, high eccentricity transiting giant planet. arXiv:1109.3203v1. 14 Sep. 2011.
- Deuss A., Woodhouse J.H., Paulssen H., Trampert J. The observation of inner core shear waves. *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 67-73.
- Falzone A.J., Stacey F.G. Second-order elasticity theory: explanation for the high Poisson's ratio of the inner core. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1980. V. 21. P. 371-377.
- Farouki R.T., Hamaguchi S.J. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. II. Molecular dynamics simulations. *Chem. Phys.* 1994. V. 101. P. 9885-9893.
- Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. *Nature* 1992. V. 356. P. 16-17.
- Hamaguchi S. J., Farouki R.T. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. I. Derivation of the excess energy. *Chem. Phys.* 1994. V. 101. P. 9876-9884.
- Hilgenberg O. *Vom wachsenden Erdball*. B. 1933, 56 p.
- Jephcoat A., Refson K. Core beliefs. *Nature* 2001. V. 413. P. 27-30
- Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*. 1990. V. 347. 272-273.
- Lamoreaux S.K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78. P. 5-8.
- Lampe M., Joyce G., Ganguli G., Gavrishaka V. Interactions between dust grains in a dusty plasma. *Phys. Plasmas*. 2000. V. 7. P. 3851-3861.
- Langer J.S. Instabilities and pattern formation in crystal growth. *Rev. Mod. Phys.* 1980. V. 52. P. 1-28.
- Larson R.L. Geological consequences of superplumes. *Geology*. 1991. V. 19. P. 963-966.
- Maddox, J. Plasma dust as model crystals. *Nature* 1994. V. 370. P. 411.
- Mao H., Shu J., Shen G., Hemley R.J., Li B., Singh A.K. Elasticity and rheology of iron above 220 GPa and the nature of the Earth's inner core. *Nature* 1998. V. 396. P. 741-743.
- Melzer A., Trottenberg T., Piel A. Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices. *Phys. Lett. A*. 1994. V. 191. P. 301-308.
- Merlino R.L., Barkan A., Thompson C., D'Angelo N. Laboratory studies of waves and instabilities in dusty plasmas. *Phys. Plasmas*. 1998. V. 5. P. 1607-1614.
- Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth // *Science*, 1969, V. 166, P. 609-611.
- Mohideen U., Roy A. Precision measurement of the Casimir force from 0.1 to 0.9 μm . *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 4549-4552.
- Nosenko V., Goree J., Ma Z.W., Piel A. Observation of shear-wave mach cones in a 2D dusty-plasma crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. P. 135001-4.
- Ohta H., Hamaguchi S. Wave dispersion relations in Yukawa fluids. *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 6026-6029.

- Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. *Earth Plan. Sci. Lett.* 1998. V. 164. P. 23-30.
- Owen H.G. The Earth is expanding and we don't know why // *New Scientist*, 1984, P. 27-29.
- Piel A., Nosenko, Goree J. Experiments and molecular-dynamics simulation of elastic waves in a plasma crystal radiated from a small dipole source. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. P. 085004.
- Pramanik J., Prasad G., Sen A., Kaw P.K. Experimental observations of transverse shear waves in strongly coupled dusty plasmas. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. P. 175001-4.
- Shukla P.K. Generation of zonal flows by drift waves in a dusty plasma. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3822-3825.
- Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E. First-principles elastic constants for the hcp transition metals Fe, Co, and Re at high pressure. *Phys. Rev. B.* 1999. V. 60. P. N 791-799.
- Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E., Gulseren O. Elasticity of iron at the temperature of the Earth's inner core. *Nature* 2001. V. 413. P. 57-60.
- Steiner J. An expanding Earth on the basis of sea-floor spreading and subduction rates. *Geology.* 1977. V. 5. P. 313-318.
- Stenflo L., Shukla P.K. Dust acoustic waves in thin dusty layers. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3472-3473.
- Stenflo L., Shukla P.K., Yu M.Y. Dust acoustic surface waves on a dusty plasma slab. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 2731-2732.
- Terasaki H., Kato T., Urakawa S., et al. The effect of temperature, pressure, and sulfur content on viscosity of the Fe-FeS melt. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 190. P. 93-101.
- Thomas, H., Morfill G.E., Demmel V. et al. Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma. *Phys. Res. Lett.* 1994. V.73. P. 652-655.
- Thomas H., Morfill G. Melting dynamics of a plasma crystal. *Nature* 1996. V. 379. P. 806-809.
- Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. *Science* 1991. V. 252. P. 384-389.
- Wells J.W. Coral growth and geochronometry. *Nature* 1963. V. 197. P. 948-950.
- Wigner, E. On the interaction of electron in metals. *Phys. Rev.* 1934. V. 46. P. 1002-1011.
- Winter J. A new challenge in nuclear fusion research? *Phys. Plasmas* 2000. V. 7. P. 3862-3866.