

### Глава III. 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.

#### III. 1. Суть модели горячей Земли.

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

$$E = 3/5 GM^2/R = 2.25 \times 10^{39} \text{ эрг}, \quad (3.1)$$

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 (самогравитация). 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 ( $d$ ) не превышающую 400 - 600 км. [ $d \approx (\zeta t)^{1/2}$ , где  $\zeta$  - температуропроводность земного вещества ( $\approx 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с)]. Этот довод практически “закрыл” все дальнейшие попытки разработки модели “горячей” Земли. Для геофизиков остался лишь один путь - развитие модели “холодной” Земли. 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 книге мы принимаем “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:

$$T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p. \quad (3.2)$$

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  $T = 30\,000\text{K}$  ( $\approx 3$  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:  $(gR_g T/m)^{1/2}$  к величине скорости Р-волн внутреннего G-ядра ( $v_p = 11.2$  км/с), получаем:  $T/m \approx 1$ , ( $T$  в  $10^4$  К). Здесь:  $g = c_p/c_v$  - показатель адиабаты,  $R_g$  - газовая постоянная,  $m$  - молекулярный (атомный) вес вещества.

Оценим величину  $T/m$  из равенства:  $nkT = rgR = 3.5 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> (давление в центре Земли), где  $n = r_G/m$  - концентрация вещества,  $r_G$  - плотность вещества G-ядра,  $m$  - вес протона,  $k$  - постоянная Больцмана,  $r$  - средняя плотность Земли,  $g$  - сила тяжести,  $R$  - ее современный радиус, а получаемая величина  $T/m \approx 1/3$ . Эта оценка, на наш взгляд, более правдоподобна, чем первая. Принимая величину  $T = 30\ 000$  К, получаем  $m \approx 10$ . 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  $m$  "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. 1-3, Глава I). 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 ( $r_0$ ), которая могла достигать 35 г/см<sup>3</sup>. 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:  $m < 10$ . 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.

### III. 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. Мы с Вами частично касались этого вопроса во Введении, когда цитировали академика А.Л.Яншина. На самом деле данных, подобных тем, которые приводит Яншин, значительно больше. Практически все они, в той или иной степени, находятся в противоречии с моделью холодной Земли. Ниже мы обратимся к известным фактам из истории эволюции Земли в контексте нашей модели.

*Радиус Земли.* 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:  $\zeta = l/rc_p$ , где  $r$  - плотность, а  $l$  - коэффициент теплопроводности. Для обычных веществ величина  $\zeta = 0.1 - 0.01$  (см<sup>2</sup>/с). Поначалу, наращивание мантии происходило очень медленно:  $l \sim (\zeta t)^{1/2}$ ,  $t$  - время эволюции. Так продолжалось до тех пор, пока ее толщина  $l$  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  $\Delta T$ , возникает при числе Релея  $Ra > 1710$ :

$$Ra = (g b l^3 \Delta T) / (h\zeta). \quad (3.3)$$

Подстановка характерных для вещества мантии Земли величин ускорения силы тяжести  $g$ , коэффициента объемного расширения  $b$ , кинематической вязкости  $h$ , и коэффициента температуропроводности  $\zeta$ , для  $\Delta T = 10^4$  К, определяет величину  $l^* \approx 300$  км.

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

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

$$Re \sim Pr \sim Ra^{1/2}. \quad (3.4)$$

В свою очередь, число Релея (3.3)  $Ra \sim l^3$ . 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  $\Delta R$ , 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. 3-1).

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 3-1

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.

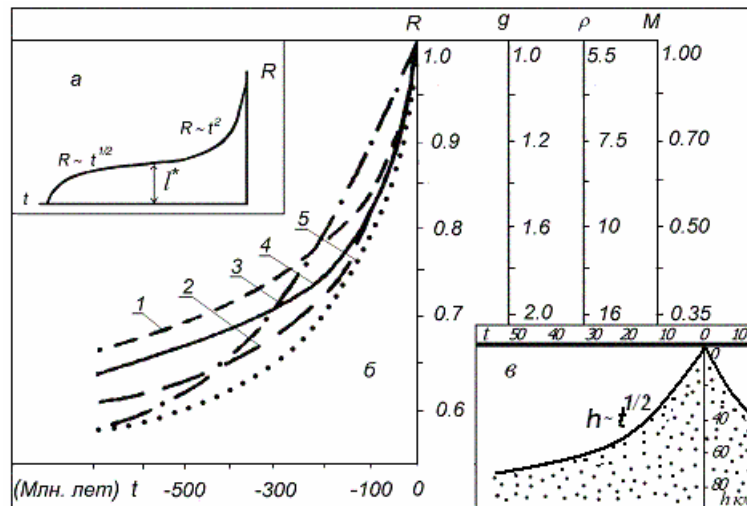


Рис. 3-1. Изменение радиуса Земли  $R$  от времени её эволюции (Кузнецов, 1990). (а) - в течение всего периода эволюции  $t$ , за последние 500 млн. лет: - (б). Здесь  $R(t)$ ,  $g(t)$ ,  $\rho(t)$ : 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна (Owen, 1984), 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов  $M(t)$  – 5. Толщина литосферы  $h$  (км) от расстояния ( $t$  в млн. лет) до оси рифта - (в).

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, 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.

*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  $35 \text{ г/см}^3$ , что в три раза больше современной величины плотности вещества внутреннего ядра  $r_G$ . Величина современного давления в центре Земли оценивается как  $p = rgR = 3.5 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$ . Давление в центре Земли в момент ее образования (по нашей модели)  $p_o = r_o g_o R_o$  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,  $p \sim r^{5/3}$  (примерно:  $p \sim r^2$ ). 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  $g_o \approx 3.5 g$ ), чем оцененная нами. (Вряд ли начальная температура вещества Земли  $T_o$  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  $T_o$ ).

Тем не менее, если принять  $T_o \gg 2T$  и учесть зависимость  $r$  от  $p$  ( $p \sim r^2$ ), то можно оценить величину  $m_b$ . Так как  $T/m \sim p/r \sim (p)^{1/2}$ , то  $T_o/m_b \approx 1$ , а величина  $m_o \approx 5$ , 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  $m$  уменьшилась вдвое. Будем полагать, что  $m^*$  современной Земли:  $m^* \approx 50$  (не путать с  $m$  внутреннего ядра). Массу Земли можно представить:  $M = Nm m^*$ , где  $N$  - полное число атомов (молекул). Массу потерянного Землей водорода, аналогично:  $M_H = 10N m m_H$ , где  $m_H = 1$  - 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  $M_o$ , что, при наших точностях оценок, не должно особенно сказаться. (Эта оценка будет полезна нам при рассмотрении физики образования углеводородов в Главе V).

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  $T dS \gg U$ , где  $U$  - теплота фазового перехода - конденсации,  $U = (10-15) \text{ кДж/г}$ . Величина теплового потока в этом случае:

$$Q = T \times dS \mathcal{M}/t_o, \quad (3.5)$$

где  $t_o$  - время эволюции Земли ( $t_o = 4.5 \cdot 10^9$  лет), оказывается равной  $Q = 10^{29} \text{ эрг/год}$ , 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.

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.

*Эволюция  $pT$ -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.

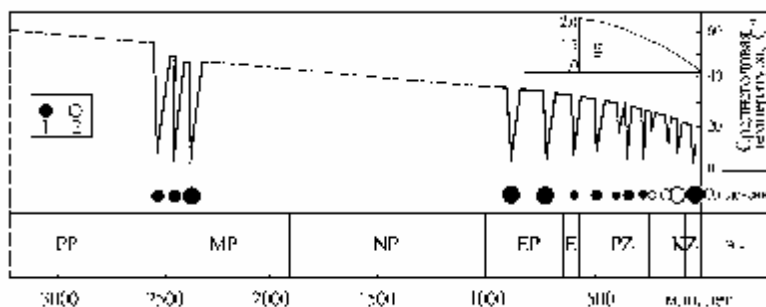


Рис. 3-2. Температура поверхности Земли. В правом верхнем углу зависимость:  $g(t)$ .

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. Изменения климата и их связь с геомагнитным полем будет рассмотрена в главе IX.

Наиболее важной характеристикой климатического процесса - 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. 3-2). По видимому, есть основания считать, что температура на поверхности Земли примерно 3.8 млрд. лет назад приближалась к  $100^{\circ}C$  (Океаны кипели! Если, конечно, не учитывать тот факт, что и 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 3.1

| Период          | Возраст, млрд. лет | Темп. поверх. $^{\circ}C$ | Атмосферное давление | Состав атмосферы  |
|-----------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| Катархей        | 3.75 - 3.5         | 100                       | 20                   | $H_2, CO_2, H_2O$ |
| Палеопротозой   | 3.5 - 2.6          | 70                        | 10 - 20              | $H_2, CO_2, H_2O$ |
| Мезопротозой    | 2.6 - 1.9          | 60                        | -                    | $H_2O, 1\% O_2$   |
| 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 3.1. Из таблицы 3.1, как и из рисунка 3-2, 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  $10^3 K$ . Эта величина оценивается следующим образом. Температура плазмы вещества Земли в момент образования достигала нескольких электронвольт ( $1 \text{ эВ} \approx 10^4 K$ ). 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):

$$K = \int q dV = \int S_o d\Sigma, \quad (3.6)$$

где  $dV$ - элемент объема тела,  $d\Sigma$ - элемент его поверхности,  $S_o$ - нормальная составляющая потока излучения на поверхности тела:  $S_o = s T^4$ ,  $T$  - температура поверхности тела,  $s$  - 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  $\chi$ :  $l \sim 1/\chi$ . С учетом сказанного, поток излучения  $S^* \gg (l/x) \sim sT^4$  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):

$$1/l = 4.86 \cdot 10^{-7} p^{1.31} \times \exp(4.56 \cdot 10^4 T). \quad (3.7)$$

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

$$1/l \approx 5 \cdot 10^{-7} p^{1.3}, \quad (3.8)$$

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  $t_o$  через  $T_o$ . Тепловая энергия Земли  $E$  может быть записана так:

$$E = c_V M T_o,$$

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  $\Delta E$ , “уносимой” за счет радиационного охлаждения, определим в соответствии с формулой для  $S^*$ :

$$\Delta E \gg (l/x) \sim s T^4 s t, \quad (3.9)$$

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

$$E_1 = c_V M T_1 = c_V M T_o - (l/x) \sim s T_o^4 s t, \quad (3.10)$$

или:

$$T_1 = T_o [1 - ((l/x) \sim s T_o^3 s t) / c_V M]. \quad (3.11)$$

Таким образом, получаем формулу вида:

$$T_1 = T_o (1 - a T_o^3), \quad (3.12)$$

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

$$T_2 = T_1 (1 - a T_1^3) \text{ и т.д.} \quad (3.13)$$

Величина  $a$  ( $a \sim [T_1 - T_2] / T_1^4$ ) зависит от температуры и текущего значения  $l$ , т.к. все остальные величины в формуле  $a$  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 3-3). 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  $a$  (в рассматриваемом нами диапазоне от 0.5 до 3.5 млрд. лет) незначительно увеличивалась и составляла величину  $a = (3 - 5) 10^{-10} K^{-3}$ . (Наши более ранние оценки (Кузнецов, 1990), соответствовали величине  $a = 10^{-9} K^{-3}$ ). Величина  $l$  оказывалась порядка 1 м, что на четыре порядка меньше её современного значения.

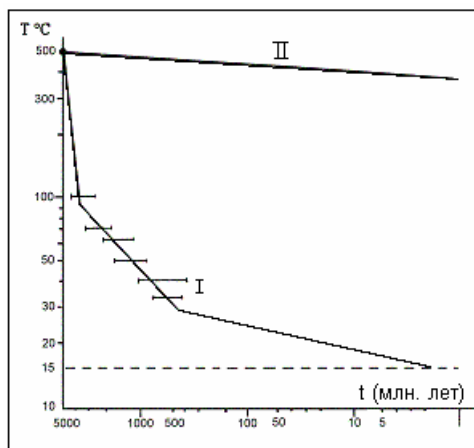


Рис. 3-3. Температура Земли (I) и Венеры (II) в течение времени эволюции.

Продолжим прямую  $lgT - lgt$  в область более низких температур, тогда она пересечет изотерму  $15^{\circ} C$  в точке, соответствующей примерно 50 млн. лет назад. Температура  $15^{\circ} C$ , 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.

Оледенения на Земле были, это общепризнанный факт. Поэтому, такое продолжение температуры в область времени, меньше чем 500 млн. лет назад, неправомечно. 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  $a$ , 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  $a$  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,  $100^\circ$  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  $a$  атмосферы Венеры окажется меньше чем у Земли примерно на порядок. Для оценок, примем для начальной атмосферы Венеры:  $a = 3 \cdot 10^{-11}$  К<sup>-3</sup>. При этом характер изменения температуры поверхности меняется существенным образом (см. рис. 3-3). 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 нашего 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. 3-4). 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 хребт (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.

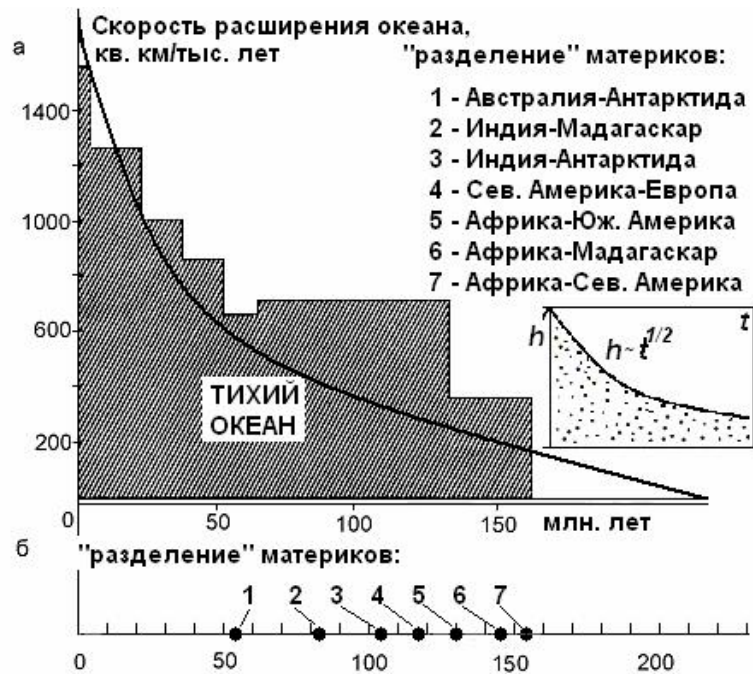


Рис. 3-4. Скорость расширения океанов (на примере Тихого океана) - а. Время разделения материков - б. На вставке – зависимость глубины астеносферы от времени образования океанического дна в районе СОХ.

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. км<sup>3</sup>. При средней глубине современных океанов порядка 4-х км, это соответствует примерно 1/3 площади поверхности современной Земли. Радиус Земли увеличился, за последние 160 млн. лет, 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. 3-1). 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. 3-4-а), 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  $3000 \text{ км}^2$  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 ( $5 \times 10^8 \text{ км}^2$ ). 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  $9.6 \text{ см/год}$ , для Индийского океана -  $7.6 \text{ см/год}$  и для Атлантического -  $4.3 \text{ см/год}$ .

Современные океаны возникали, расширялись и “раздвигали” материки, которые, судя по всему, 160 млн. лет тому назад были значительно ближе друг к другу. Рисунок 3-4-б (Courtilot, 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. 7-4). 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. 3-4-б, 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.

Надо сказать, что, 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).



Рис. 3-5. Событие на границе миоцена и плиоцена (Мёрнер, 1986).

Не менее удивительны и другие синхронные проявления активности Мирового океана, атмосферы и климата: эти корреляции известны геологам как трансгрессии и регрессии. Например, Н.А. Мёрнер (1986) исследовал несколько катастрофических событий, одно из которых произошло на Земле на рубеже эоцена и олигоцена (рис. 3-5), 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 (см. ниже, в VI и IX главах книги). 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. 3-6), предшествующих, характеризуется рядом признаков:

- 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 (см. главу IX), 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. 3-5). 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.

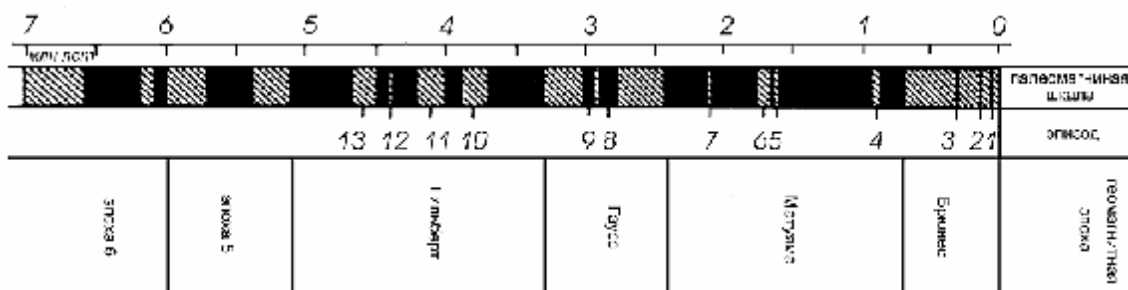


Рис. 3-6. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн. лет.

Итак, на Земле происходили глобальные катастрофические явления: массовые вымирания, оледенения, потопы, 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).

*Гравитационное поле.* Все, что окружает нас на поверхности Земли, испытывает действие силы тяжести, она направлена вертикально вниз и воспринимается нами как вес. Сила тяжести пропорциональна массе тела. Коэффициент пропорциональности обозначается обычно через  $g$  и называется ускорением свободного падения. На поверхности Земли ускорение свободного падения приблизительно равно  $980 \text{ см/с}^2$  или 980 Гал (в честь Галилея). Сила притяжения уменьшается примерно на 0,3 мГал при подъеме тела на высоту в 1 метр относительно земной поверхности. Земля, как известно, вращается, поэтому на тело, находящееся на ее поверхности, кроме силы тяжести действует еще одна сила - центробежная. Эта сила максимальна на экваторе, где величина  $g$  уменьшается под ее влиянием на 3,4 Гала. На полюсах центробежная сила отсутствует.

Из закона всемирного тяготения вытекает, что:

$$g = GM/R^2, \quad (3.14)$$

где  $M$  - масса Земли,  $R$  - ее радиус,  $G$  - гравитационная постоянная. Коэффициент пропорциональности  $G$  необходим для согласования размерностей обеих частей равенства (3.14). Ньютон показал, что  $G$  величина постоянная и открытый им закон тяготения универсален. Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна так же содержит  $G$  в качестве фундаментальной константы.

Гравитационный потенциал Земли можно выразить следующим образом:

$$j = GM/R + G/R^3 \times [(A + B)/2 - C] (3/2 \cos 2q - S) + W^2 R^2 / 2 \sin q. \quad (3.15)$$

Здесь:  $A$ ,  $B$  и  $C$  - моменты инерции Земли относительно ее основных осей, угол  $q$  - дополнение к широте,  $W$  - частота вращения Земли.

Как следует из формулы (3.15), сила тяжести (гравитационный потенциал) на поверхности Земли может измениться со временем, если будут меняться: гравитационная постоянная, масса Земли или ее радиус, а так же скорость вращения. Рассмотрим возможные модели, в которых эти параметры могут изменять свои значения в течение времени эволюции Земли.

С точки зрения физики, наибольший интерес представляет идея об изменении величины гравитационной постоянной  $G$  высказанная Дираком (Dirac, 1938). Он обратил внимание на безразмерную постоянную  $e^2/4\pi G m_e m_p$ , которая по порядку величины равна  $10^{40}$ . Эта постоянная может быть получена следующим образом. Сила взаимодействия протона и электрона в атоме водорода обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:  $F_e = e^2/4\pi r^2$ . То же самое относится и к гравитационному взаимодействию:  $F_g = G m_e m_p / r^2$ . Если составить отношение сил электростатической и гравитационной, то получится постоянная Дирака. Он высказал предположение (гипотеза больших чисел), что такое большое число в природе не может быть случайным, и связал это число с возрастом Вселенной. По последним оценкам ее возраст ( $T$ ) составляет примерно 18 млрд. лет. Год - это искусственная единица времени. Дирак воспользовался атомной единицей времени, в которой за отсчет берется интервал времени, в течение которого свет проходит "сквозь" классический электрон  $e^2/4\pi m_e c^3$ . Возраст Вселенной в этих единицах оказывается равным  $\approx 10^{40}$ . Дирак предположил, что эти очень большие числа действительно равны, т.е.:

$$e^2/4\pi G m_e m_p \approx T. \quad (3.16)$$

В атомной системе единиц заряд электрона  $e$ , массы протона и электрона  $m_p$  и  $m_e$  постоянны, если возраст Вселенной  $T$  растет, значит должна изменяться гравитационная постоянная ( $G \sim 1/T$ ). В соответствии с возрастом Вселенной за год это изменение должно составлять  $5 \times 10^{-11}$ .

П. Дирак обратил внимание еще на одну очень большую безразмерную величину - полную массу Вселенной, выраженную в массах протона (примерно  $10^{80}$ ). Согласно гипотезе больших чисел следует ожидать, что это число пропорционально возрасту Вселенной в квадрате ( $\sim T^2$ ). Это означает, что во Вселенной должно рождаться вещество, причем рождаться непрерывно. Дирак предположил два различных механизма этого явления. В первом из них новое вещество непрерывно рождается во всем пространстве Вселенной. Это, так называемое, - аддитивное рождение. Либо оно рождается рядом с уже существующим веществом, - это мультипликативное рождение. В предположении аддитивного рождения вещества масса Солнца  $M_\odot$  остается приблизительно постоянной величиной, следовательно  $(G \sim M_\odot) \sim 1/T$ . Если имеет место мультипликативное рождение,  $M_\odot \sim T^2$ , т. е.  $(G \sim M_\odot) \sim T$ .

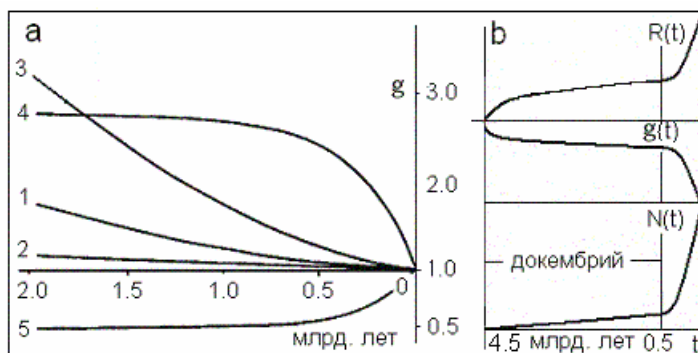


Рис. 3-7. а - Изменение силы тяжести во времени по различным моделям: 1 – Дике, 2 – термического расширения. 3 – Каппа, 4 – наша, 5 – Веселова и др. б – Изменение радиуса Земли  $R(t)$ , силы тяжести  $g(t)$ , численности биологической популяции  $N(t)$ .

Идеи П.Дирака были развиты и обобщены В. Кануто, П. Джорданом, Р. Дике и др. Проводимые ими исследования в значительной степени касались изменения во времени величины земного радиуса и величины ускорения силы тяжести в зависимости от вариации гравитационной постоянной (см. рис. 3-7-а). Кануто (Canuto, 1981) предполагал возможность вариации величины  $G$ , при этом, он считал, что при вариациях земного радиуса происходит превращение части потенциальной гравитационной энергии в энергию электромагнитного поля (?). Дике (Dicke, 1962) показал, что нет принципиальной разницы между предположениями об изменении массы и изменении гравитационной постоянной. Можно предположить, что в постоянной Дирака изменяется со временем электрический заряд, однако, как было показано (Sabbata, 1980), это противоречит современным экспериментальным данным.

Общая теория относительности не удовлетворяет тезису Дирака, но может быть соответствующим образом обобщена, что было сделано сперва Джорданом (Jordan, 1979), а затем Брансом и Дике (Brans, Dicke, 1961). Из теории Джордана вытекает факт творения материи. Бранс и Дике, введя дополнительное к гравитационному скалярное поле, собственно связанное с изменением величины  $G$ , “обошли” эту трудность.

Идея “творения” материи, т.е. постоянный рост массы Земли в процессе ее эволюции, по всей видимости, принадлежит русскому, И.О. Ярковскому (1889) (Carey, 1976). Эта идея развивалась О. Хильгенбергом (Hilgenberg, 1933), поддерживалась С. Кэри (Carey, 1976) и, в большей степени, русскими: И.В.Кириловым, В.Ф.Блиновым (1984) и др. Отметим серию работ К.Е. Веселова и др. (1976, 1981, 1984, 1993), в которых авторы, для объяснения концепции глобального рифтогенеза, пытаются создать корпускулярную модель гравитационного поля. В ее основе лежит необоснованное предположение о наличии гипотетического “гравитационного вакуума”, в котором с огромной скоростью носятся частицы (по всей видимости, гипотетические гравитоны). График поведения во времени величины  $g$ , следующий из “корпускулярной модели гравитации и инерции” Веселова, так же как и для других моделей, приведен на рис. 3-7.

Альтернативная всем предыдущим и поэтому стоящая несколько в стороне, гипотеза была высказана Каппом (Karr, 1960), предложившим идею, согласно которой масса Земли 2 млрд. лет тому назад была примерно в 30 раз больше современной, а ее радиус - в три раза больше. Капп считал, что в процессе эволюции Земли ее недра подвергались гравитационному коллапсу, в результате действия которого терялась ее масса (?). Этот процесс он называл buckling, что можно перевести как затягивание ремня пряжкой (другой, шуточный вариант, - жениться) (рис. 3-7). Эта идея перекликается с подходом развиваемым Холмсом (Holmes, 1965), согласно которому в процессе эволюции Земля подвергалась деструкции и уплотнению. Ее изначально “пустые” внутренние объемы сжимались, выбрасывая на поверхность Земли атмосферные газы и воду.



*Изменение гравитационного поля в прошлом.* Менялось ли гравитационное поле Земли в процессе её эволюции? Ответить однозначно на этот вопрос нельзя и в наше время. Прошло четверть века с момента написания профессором университета в Рединге (Англия) А.Д. Стюартом (Stewart, 1970) обзора “Palaeogravity” на эту тему. Некоторые вопросы, затронутые им, были уточнены за прошедшие с той поры 25 - 30 лет, получены новые экспериментальные данные. Однако нельзя сказать, что в выяснении этого вопроса достигнут большой прогресс. Надо заметить, что тематика исследований, связанных с поведением гравитационного поля Земли в прошлом, не была эти годы особенно популярной. Новых работ появилось довольно мало. Тем не менее, несмотря на определенные успехи в области изучения стабильности во времени гравитационной постоянной и массы Земли, появляются статьи и книги, в которых авторами игнорируются экспериментально полученные данные по стабильности этих параметров. Стюартом были рассмотрены основные идеи, касающиеся физических моделей, в которых оказывается возможным изменение со временем величины силы тяжести на поверхности Земли. Здесь добавлены известные автору немногочисленные работы, в которых предпринималась попытка оценки величины  $g$  в прошлом (Stewart, 1972; Смирнов, Любина, 1969; Шмидт-Нильсон, 1976; Кренделев, 1977; Кузнецов, 1996). Основные результаты экспериментов по оценке степени стабильности массы и гравитационной постоянной заимствованы из статей (Flandren, 1975; Миллюков, 1986; Shapiro et al., 1976).

*Системы чувствительные к изменению силы тяжести.* Стюарт рассматривает несколько таких систем, которые можно разбить на три подгруппы: К первым отнесем системы, в которых изменение силы тяжести оказывает влияние на геодинамические процессы и явления. Стюарт рассматривает влияние релей-тейлоровской неустойчивости, возникающей при образовании осадочных пород в водной среде; подъем диапиров в мантии и мантийные конвективные системы. Ко второй подгруппе систем можно причислить: гравитационное сжатие глин, палеобарометрический метод и сжатие, и преобразование горных пород движущимися палеоледниками. Третья группа систем базируется на использовании чувствительности к величине силы тяжести биологических объектов, обитавших на Земле в прошлом: оценка размеров летающих животных, оценка относительного веса скелетов земных животных и глубины оставленных ими окаменевших следов.

Прежде чем подробнее рассмотреть эти и близкие к ним системы, обратим внимание на один существенный на наш взгляд момент. Стюарт рассматривал эти геологические данные с основной целью: использования их для оценки изменения величины  $G$  и выяснения степени правдоподобия теории Дирака. Стюарт полагал, что изменение  $g$  однозначно определяется уменьшением гравитационной постоянной. Как будет показано нами ниже, астрономические методы оценки стабильности  $G$  и  $M$  намного точнее геологических, хотя и более дорогие, и сложные. Нас будут интересовать эти системы в основном с точки зрения возможности оценки не столько величины  $g$ , существовавшей на поверхности Земли в геологическом прошлом, сколько характера ее изменения. С помощью геологических методов достоверно оценить величину  $g$  в прошлом, по-видимому, невозможно, поэтому на первом этапе исследований было бы достаточным четко определить, была ли величина  $g$  в прошлом больше или меньше современной. Как будет ясно из последующего текста, мнения геологов на этот счет расходятся на диаметрально противоположные.

*Геодинамические системы.* Релей-тейлоровская неустойчивость возникает обычно в гидродинамической среде, если среда состоит из слоев вещества разной плотности, причем в силу каких-то обстоятельств в системе оказалось так, что плотность верхнего слоя выше, чем нижележащего. Такая ситуация может возникнуть в осадконакоплении в

водной среде, когда например, слой тяжелого песка окажется на более легкой глине. Более тяжелый слой, находящийся на слое с меньшей плотностью деформирует пограничный слой в виде синусоидальной волны с длиной волны  $l$  от долей сантиметра до нескольких метров. Слой осадков можно представить в виде ньютоновской жидкости с вязкостью  $h$ , которая подвергается растяжению. В нашей модели можно записать: волновое число  $k \sim (g/h^3)^{1/3}$ , и ускорение силы тяжести  $g \sim l^{-3}$ . Предположим, что в древних осадочных породах наблюдается эффект образования синусоидальных волн, обязанный развитию релей-тейлоровской неустойчивости. Причем, «длина волн» неустойчивости была в древних породах меньше, чем в молодых. Это свидетельствовало бы в пользу уменьшения величины  $g$  в течение эволюции Земли.

Стюарт рассматривает механизм подъема соляных диапиров, как способ оценки величины  $g$ . Плотность соли обычно меньше чем плотность покрывающих ее пород. Если по каким-либо причинам образовался соляной купол высотой  $L$ , а толщина слоя покрывающих пород над вершиной купола  $T$ , то возникает выталкивающее давление:

$\Delta p = gL(r_2 - r_1)$ . Здесь  $r_2$  - плотность покрывающих пород,  $r_1$  - плотность соли ( $r_2 > r_1$ ). Если вещество диапира обладает свойствами жидкости (т.е. вязкостью), то диапир будет подниматься под воздействием выталкивающего давления. Время подъема диапира (время "протыкания"  $t$ ) определяется такими параметрами как, вязкость его вещества:

$m$  ( $m = n \cdot r$ ), разность в плотностях  $\Delta r$ , величина  $L$  и ускорение силы тяжести  $g$ :

$$t = m / g L r.$$

Допустим, к примеру, что два диапира "протыкали" покрывающие их породы в геологически разные времена. Причем, такие их параметры как вязкость, плотность и начальная глубина  $T$  были одинаковы, а время "протыкания" более древнего диапира было меньше, чем у более молодого. Этот факт говорил бы в пользу того, что величина  $g$  со временем уменьшалась и наоборот.

В подтверждение "работоспособности" этой модели Стюарт приводит результат лабораторного эксперимента, в котором соляной "диапир" протыкал покрывающий его слой из асфальта толщиной в полтора сантиметра в течение 0,5 - 3 суток.

В конвективной модели мантии, предложенной Ранкорном в 1962 г., скорость конвекции вещества мантии  $V$  определялась плотностью вещества -  $r$ , коэффициентом объемного расширения -  $b$ , разностью температур на верхней и нижней плоскостях конвективной ячейки -  $\Delta T$ , толщиной ячейки -  $R$ , величиной вязкости вещества -  $m$  и ускорением силы тяжести -  $g$ :

$$g r b \Delta T = m V / R^2$$

Стюарт особо оговаривает такой немаловажный момент, касающийся вязкости. Он считает, что предположение о постоянстве вязкости может ввести в заблуждение. Тем не менее, опуская из рассмотрения ряд параметров, Стюарт обсуждает упрощенную формулу:

$$g = (k \cdot V) / \Delta T,$$

согласно которой сила тяжести связана со скоростью конвекции и разностью температур на конвективной ячейке. По ходу обсуждения проблемы, Стюарт делает глобальное обобщение: не является ли континентальный дрейф следствием изменения гравитационного поля Земли.

*Сжатие глин.* Сжатие глин давлением гравитации (весом вышележащих слоев) Стюарт считал идеальной системой для измерения величины силы тяжести в прошлом. Он разработал метод, хотя и не позволяющий определить точную величину палеогравитационного поля, но дающий возможность найти скорость уменьшения ускорения силы тяжести  $g$  со временем (Stewart, 1972). Стюарт полагал, что если величина  $g$  в прошлом была больше современной, то, вполне возможно, что некоторые тонкозернистые осадочные породы могли оказаться уплотненными в большей степени, чем это должно было бы произойти, если бы они уплотнялись под весом осадочного слоя

существующего в настоящее время. Процесс уплотнения происходит относительно быстро и является практически необратимым, поэтому такие "свидетели" переуплотнения могли бы сохраниться.

Стюарт произвел измерения степени консолидации осадков в Лондонском бассейне. Он нашел, что глины в обнажениях этого бассейна консолидировались при более высоких давлениях, чем давления, соответствующие современной максимальной толщине перекрывающих осадков в Лондонском бассейне. Стюарт допускал, что здесь могли быть еще слои осадков, которые затем были размыты. Однако если консолидация глин произошла все же за счет большей величины силы тяжести в прошлом (у Стюарта - 26 млн. лет назад), то величина  $g$  не могла быть больше современной в два раза. Это означает, что максимальное уменьшение  $g$  за 26 млн. лет составляет  $4 \times 10^{-8}$  в год. Скорость уменьшения  $g$ , по нашей модели, примерно в 10 раз меньше (рис.3-1).

Суть палеобарометрического метода предложенного Стюартом для оценки величины  $g$  в прошлом состоит в определении градиента палеолитостатического давления:

$$g \sim (p_2 - p_1) / L(r/e),$$

где  $p_2$  и  $p_1$  - литостатические давления двух уровней,  $L$  - расстояние между уровнями  $r$  - их средняя плотность. Разность литостатических давлений можно определить, как считает Стюарт, минералогическими методами. Оценка  $g$  может быть сделана в том случае, если известна  $e$ . Точное определение величины  $e$  представляет очевидную трудность, что ставит применение предлагаемого метода непригодным в ряде случаев, например, в сейсмически активных районах, где величина  $e$  может изменяться со временем.

Способ оценки  $g$ , как результат сжатия горных пород древними ледниками и определение степени сжатия по глубине оставленных ледниками борозд, как мы отмечали, предлагал еще Холмс. Стюарт считал этот метод наиболее перспективным из всех трех обсуждаемых Холмсом. Аналогичный метод обосновал он сам. Стюарт считал возможным оценивать степень округлости валунов находящихся в осадочных слоях. Валуну изначально были раздроблены весомдвигающихся ледников, а затем, при движении их под давлением ледника в воде со скоростью  $v$ , они постепенно приобретали округлую форму. Сила "плавучести" валунов определяется формулой:

$$D = 4/3 \pi r^3 (r_1 - r_2) g,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  - плотности валунов и воды соответственно,  $r$  - их радиус. С другой стороны, эта сила уравнивается сопротивлением среды, которую можно выразить через скорость  $v$ :

$$D' = 1/2 \times C \pi r^2 r_2 v^2.$$

В результате, Стюарт получил зависимость скорости движения валунов от величины ускорения силы тяжести:  $v^2 = (8 r \Delta r g) / C r_2$  ( $C$  - константа). Для количественной оценки необходимо получение природной информации о зависимости скорости  $v$  от  $g$  для различных типов глин, пород и размеров валунов.

Как выше отмечалось, Холмс считал метод оценки величины  $g$  по углам осадочных слоев совершенно непригодным. Подобные исследования были выполнены Смирновым и Любиной (1969), где авторы проанализировали информацию по углам наклонов косых серий в дюнах водной и эоловой природы и углам наклонов фронтальных откосов этих образований из отложений различного возраста (от раннего протерозоя по кайнозой). На довольно малой и непредставительной выборке авторы приходят к выводу, что с течением времени углы наклона косых серий изменяются и, по их мнению, скорее уменьшаются, чем возрастают и, что этот эффект связан с увеличением ускорения силы тяжести с течением времени. Правомерность этого вывода вызывает сомнение. С другим выводом авторов нельзя не согласиться, что "реконструкция  $g$  является важнейшей задачей науки о Земле" (Смирнов, Любиная, 1969, стр. 877).

*Палеонтологические данные.* Размер крыльев летающих животных и скорость движения крыльев, согласно Стюарту, находятся в соответствии с их весом и величиной силы тяжести:

$$m g = 1/2 \times (C S r v^2),$$

где  $C$  - безразмерный коэффициент,  $S$  - площадь поверхности крыльев,  $r$  - плотность воздуха,  $v$  - скорость движения крыла. Первое, что следует из этой формулы, это связь между ускорением силы тяжести и величинами  $S$  и  $m$ . Большая сила тяжести в прошлом у животных с одинаковой массой тела требовала больших размеров крыльев (при равной скорости их движения).

Для оценки энергетики (мощности) организма животного биологи вводит понятие интенсивность метаболизма ( $M$ ). Под этим имеется в виду превращение определенных веществ (белков, глюкозы и т.п.) внутри клеток с момента поступления веществ до образования конечного продукта. Интенсивность метаболизма измеряется в ккал/сутки и имеет смысл и размерность мощности. Эта характеристика для животных самых разных размеров (от крысы до быка) удивительно постоянно зависит от их веса, но заметно отклоняется от прямой зависимости от площади поверхности. Многочисленные исследования подтвердили, что наклон прямой в зависимости интенсивности метаболизма от веса составляет 0,734:  $M \sim (mg)^{0.734}$ , или:  $\gg (mg)^{3/4}$  (Шмидт-Нильсон, 1976). Зависимость:  $M \sim (mg)^{3/4}$  хорошо известна для животных, однако недавно аналогичная зависимость была получена и для растений (Гиляров, 1999). Под  $M$  здесь понимается величина, характеризующая интенсивность использования растениями ресурсов и их продуктивность.

Как показал Стюарт,  $M \sim L$  ( $L$  - линейный размер летающего животного, в частности, птицы). Поэтому, полагая очевидными пропорции:

$$M \sim L \sim (mg)^{3/4}; (mg)^{3/4} \sim (L g)^{3/4}$$

(если считать правомерной пропорцию:  $m \sim L$ , а не  $m \sim L^3$ , как в неживой природе);

$$L \sim (L g)^{3/4}; \text{ величина } L \text{ оказывается зависимой от } g: L \sim g^3.$$

Как это может показаться ни парадоксально, но с увеличением силы тяжести, должен возрасти размер животных. Ведь, казалось бы, что мелкому животному легче преодолеть большую величину силы тяжести, чем более крупному. Оказывается, что это ошибочное представление. Большие размеры животных (и растений) в прошлом, в этом случае, доказывают большую величину силы тяжести, чем ее современное значение.

Стюарт делает оценку величины  $g$  по относительному весу скелета животных. При этом он использует формулу Эйлера для оценки величины нагрузки на кость скелета ( $F$ ):

$$F = \pi^2 E I / L^2,$$

$E$  - модуль Юнга,  $I$  - момент инерции [ $I = (k \pi r^4)/4$ ],  $L$  - длина кости,  $r$  - ее радиус,  $k$  - константа. Подставляя, получаем:

$$F = \pi^3 k E / 4 \times (r^4 / L^2).$$

Полагая, что  $F$  должна быть: примерно равной  $mg$ , где  $m$  масса животного, зависимость ускорения силы тяжести имеет следующий вид:

$$mg \sim r^4 / L^2.$$

Масса скелета ( $m_c$ ), по всей видимости, пропорциональна:  $m_c \sim r^2 L$ , тогда величина  $g$ :

$$g \sim m_c^2 / m L^4,$$

оказывается пропорциональной отношению массы скелета животного  $m_c$  к массе его тела (в квадрате) и обратно пропорциональной размеру животного (в кубе):

$$g \sim a^2 / L^3, \quad a = m_c / m, \quad L \sim m.$$

Рассмотрим в качестве примера, два животных с одинаковыми линейными размерами: современного слона и его предка – мастодонта. Они имели одинаковую массу, но отличались друг от друга массой скелета, причем, как следует из книги Шмидта-Нильсона

(1976), скелет мастодонта более громоздкий, чем у слона. Это свидетельствует в пользу того, что сила тяжести раньше была больше чем теперь.

Сравним полученный нами результат ( $g \sim a^2/L^3$ , откуда следует,  $L \sim a^{2/3}/g^{1/3}$ ), с прежней оценкой  $L$  ( $L \sim g^3$ , и  $H \sim 1/g$ ), тогда оказывается, что  $a \sim g^5$ , т.е. должна наблюдаться очень сильная зависимость относительного веса скелета от величины силы тяжести. Трудно допустить, что такая зависимость реально имеет место в живой природе. Ф.П. Кренделев (1977), анализируя изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли, приходит к аналогичному выводу: "Уменьшение сил гравитации (ослабление гравитационного поля) приводит к уменьшению веса скелета и наоборот" (стр. 156). Он приводит таблицу, в которой относительный вес скелета человека составляет 12%, а у рептилий 14%, что, казалось бы, должно подтверждать сказанное нами выше. Однако Кренделев делает совершенно противоположный вывод, "что гравитационное поле в истории Земли медленно возрастало с момента зарождения позвоночных до современной эпохи" (Кренделев, 1977, стр. 154).

Исследование глубины следов оставленных древними животными динозаврами так же дает некоторую информацию о величине силы тяжести в прошлом. Если удалось бы показать, что глубина окаменевших следов древних животных была больше чем таких же животных, обитавших на Земле в более поздние времена, то это свидетельствовало бы о том, что величина силы тяжести со временем убывает.

Стюарт считал, что Холмс первым (1947) предложил проводить целенаправленное изучение палеогравитационного поля. Холмс пытался в природе изменения величины  $g$  найти объяснение факту увеличения скорости седиментации и активизации земной коры начавшейся в кембрии. Он связывал изменение  $g$  с уменьшением величины  $G$  и вытекающие из этого превращения минералов при понижении давления в менее плотную форму. Наиболее вероятный механизм расширения, по мнению Холмса, это конвективная циркуляция вещества в мантии. Холмс предложил три метода оценки величины  $g$ .

В первом, оценивалась глубина штрихов (борозд) под ледником, образующихся при его движении. Второй метод основывался на анализе количества фрагментов, выброшенных в геологическом прошлом из вулканов при их извержении. Третий метод оценки  $g$  основан на использовании информации об углах падения косоугольной слоистости в осадках. Стюарт отдает предпочтение первому методу, считает весьма сомнительным второй и совершенно непригодным - третий.

Таблица 3.2.

| #  | Метод                             | Параметр             | Зависимость от $g$ |
|----|-----------------------------------|----------------------|--------------------|
| 1  | Релей-тейлоровская неустойчивость | длина волны $l$      | $\sim l^{-1}$      |
| 2  | Подъем диапира                    | время $t$            | $\sim t^{-1}$      |
| 3  | Конвекция в мантии                | скорость $v$         | $\sim v$           |
| 4  | Сжатие глин                       | время $t$            | $\sim t^{-1}$      |
| 5  | Палеобарометрический метод        | расст. между сл. $L$ | $\sim L^{-1}$      |
| 6  | Движение ледника                  | скорость $v$         | $\sim v^{-2}$      |
| 7  | Углы наклона                      | углы $a$             | $\sim a$           |
| 8  | Размер летающих животных          | площадь крыльев $S$  | $\sim S$           |
| 9  | Метаболизм                        | размер $L$           | $\sim L^{1/3}$     |
| 10 | Относительная масса скелета       | размер $L$           | $\sim L^{1/3}$     |

*Жизнь и гравитация – есть ли такая связь?* Хорошо известно, что еще 100 млн. лет тому назад на Земле росли деревья, размеры которых были больше современных, на Земле обитали ящеры, максимальные размеры которых значительно превышали максимальные размеры современных животных. С другой стороны, геологи знают, что раньше на Земле не было высоких гор, а сила тяжести (возможно) была больше современной. Казалось бы, высота гор  $H$  должна зависеть от величины силы тяжести, так как она должна как бы

"противодействовать" их увеличению. Поэтому, в грубом приближении, исходя из общего принципа гидростатического равновесия литосферы Земли:  $rgH = const$ , можно положить, что  $H \sim 1/g$ . Выше мы показали, что максимальные размеры животных (и возможно, растений)  $L \sim g^3$ . (По крайней мере,  $L \sim g$ , а не  $L \sim 1/g$ ).

Получается парадоксальная ситуация: с одной стороны, если величина  $g$  раньше была больше, то высоких гор не должно было бы быть, однако, с другой стороны, размеры животных (как и высота гор) должны были бы быть меньше современных.

Решение этой задачи требует найти разумную причину замеченного парадокса. Обратим внимание на то, чем отличается в Природе живое от не живого. На эту тему имеется много различных критериев и подходов... Будем, естественно упрощенно, считать, что отличие живой Природы от неживой заключается в способности первой к метаболизму, т.е. способности клеток к преобразованию одних веществ, в другие.

Как было показано выше, ещё более 100 лет тому назад Е. Рубнер (Шмидт-Нильсон, 1976) на примере собак показал, что интенсивность метаболизма  $M$  линейно связана с площадью поверхности животных:  $M \sim S$ . В то же время, как мы отмечали выше, наблюдается  $M \sim (mg)^{3/4}$ . Преобразуем  $M \sim (mg)^{3/4}$  в:  $m \sim M^{4/3}/g$ , полагая  $m \sim L$ , получаем:  $L \sim M^{4/3}/g$ . Если соотношение  $L \sim g^3$  реально, то интенсивность метаболизма  $M$  должна зависеть от силы тяжести:  $M^{4/3} \sim g^4$ , или  $M \sim g^3$ , что, по-видимому, слишком сильная зависимость и реальнее:  $M \sim g$ .

Возникает вопрос, известно ли, что метаболизм зависит от величины силы тяжести? Оказывается, этот факт подтвержден ботаниками (Эванс и др., 1987), изучавшими механизм реакции корней растений на изменение силы тяжести. Так называемый гравитропический изгиб корня регулируется гормоном ауксином, который, в свою очередь, включается в метаболизм. Таким образом, можно полагать, что связь метаболизма с гравитацией в достаточной степени очевидна.

Предположим:  $M \sim g$ , учтем, что в нашей модели:  $g \sim 1/R^2$ , а  $R$ , в свою очередь, на первом этапе эволюции Земли:  $R \sim t^{1/2}$ , и:  $R \sim t^2$  – на втором. Вернадский утверждал, что биомасса Земли:  $B \sim NM$  – константа, а  $N$  – численность биологической популяции. Тогда,  $N \sim t$  – на начальном этапе эволюции (в докембрии), и  $N \sim t^4$  – на заключительном этапе эволюции (см. рис. 3-7-b). Эта оценка соответствует наблюдаемому характеру эволюции биосферы Земли. Сделаем несколько выводов:

- Интенсивность метаболизма древних организмов, растений и животных была выше, чем у современных. Она понижается, по мере уменьшения на Земле величины силы тяжести, что приводит к резкому возрастанию биоты.
- Жизнь на Земле может возникнуть только при наличии силы тяжести, следовательно, она не могла быть привнесена на Землю из Космоса.
- Причина глобальных вымираний, происходивших ранее на Земле, возможно, связана с резкими изменениями силы тяжести, которые, в свою очередь, могли происходить в моменты изменения величины земного радиуса.
- Зависимость относительной массы скелета животных от силы тяжести, при изменении её в течение эволюции Земли, может оказывать значительное влияние на смену биологических систем и видов животных.

*Итоги.* Подведем итоги обсуждению геологических и биологических систем чувствительных к изменению силы тяжести на Земле. Как нами отмечалось, это, конечно, качественный анализ. Ни один из рассмотренных методов не допускает возможности получить количественную оценку величины силы тяжести в геологическом прошлом. Описание методов и ссылки на оригинальные работы приведены в обзоре Стюарта (Stewart, 1972). Здесь же некоторые детали и результаты анализа методов переинтерпретированы и добавлено небольшое количество работ посвященных этой

тематике. Нас в большей степени интересовал характер зависимости того или иного параметра (размера, скорости, площади и т.п.) от величины силы тяжести  $g$ . Результаты анализа сведены в таблицу.

Анализируя таблицу 3.2 можно видеть некоторую общность результатов анализа рассмотренных методов. Например, методы (2) и (4) показывают, что если процессы в прошлом происходили быстрее чем сейчас, то сила тяжести была больше. Аналогично, если длина волны (1) и расстояние между слоями (5) были меньше, то величина  $g$  раньше была больше. Казалось бы, вполне "разумна" зависимость (8): требование большей площади крыльев при увеличении  $g$ . Заметим, что методы (9) и (10) явно коррелируют между собой. С увеличением  $g$  должны возрасти максимальные размеры древних животных. (Мы знаем, что они были раньше больше). Не смотря ни на что, она представляется противоречащей здравому смыслу. Возможным способом снять это противоречие может оказаться более сильная зависимость (чем  $L$  от  $g$ ) от величины силы тяжести относительного веса скелета животных. Предположим, что мы правы, тогда может выполняться условие:  $m_c/m \sim L^n$ , или относительный вес скелета животных возрастает с ростом их размеров, что действительно имеет место. Возможно, таким образом, устраняется кажущееся на первый взгляд противоречие: Если сила тяжести раньше была больше, и не было больших гор ("росту" которых "противодействует" сила тяжести), то с какой стати, казалось бы, "процветали" огромные ящеры? Вопрос может найти решение, если величина  $m_c/m > L$ , что означает правильность (9 и 10), несмотря на его парадоксальность и кажущееся "противоречие" опыту с высотой гор.

*Магнитное поле.* Геомангнитное поле изменялось в течение эволюции Земли. Достоверно известно, что оно периодически меняло полярность, или, как принято считать, претерпевало инверсии. Современное поле принято считать "нормальным" ( $N$ ). При этом северный магнитный полюс совпадает (близок к нему) с южным географическим. Поле обратной полярности считается "реверсивным" ( $R$ ). Инверсии поля наблюдались в течение эволюции Земли крайне нерегулярно. Рисунки 3-5 и 3-6 дают некоторое представление об этом. Известно, что в течение примерно 80 млн. лет частота инверсий менялась от примерно одной в 10 млн. лет до 5 в течение одного млн. лет. Затем, в течение примерно 40 млн. лет (от 120 до 80) инверсий не было вовсе (рис. 7-9). Периоды отсутствия инверсий наблюдались на Земле и в более ранние периоды её эволюции, они получили название суперхронов.

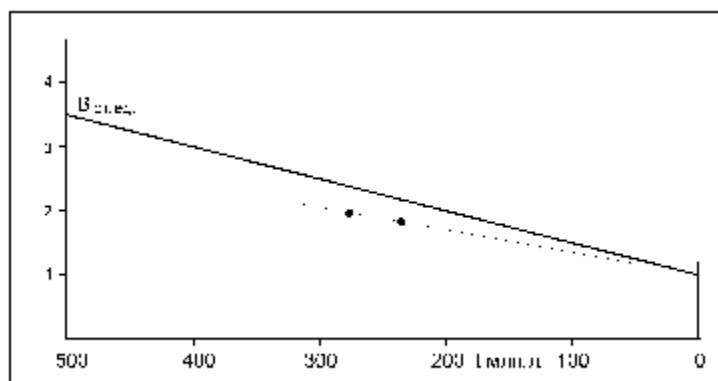


Рис. 3-8. Изменение магнитного момента (точки) по (Smith, 1967) и прямая линия - согласно нашей модели.

Известно, что магнитный момент геомагнитного поля в течение периода обсерваторских наблюдений (примерно 100 – 150 последних лет) убывает с удивительным постоянством: 5 % за 100 лет (рис. 3-8). Если так будет продолжаться, то начнется

инверсия в недалеком будущем, или интенсивность поля начнет возрастать, ясности пока нет. Как “вел себя” магнитный момент Земли в прошлом? Все магнитологи согласны с тем, что раньше он был больше (Smith, 1967), однако найти объяснение этому факту в рамках современной теории генерации геомагнитного поля найти не удастся. По Смитцу, виртуальный дипольный момент  $p_m$  (Гаусс $\times$ см<sup>3</sup>) в интервале последних 10<sup>3</sup> млн. лет вдвое за каждые 100 млн. лет уменьшался почти линейно со временем эволюции Земли. Дипольный момент  $p_m$  можно выразить через ток генерации геомагнитного поля  $I$  и площадь сечения поверхности, занятой током  $S$ :  $p_m = IS$ . Полагая, что величина тока генерации в течение эволюции Земли не меняется (подробнее о геомагнитном поле в Главе 6), момент окажется зависимым от радиуса генерации ( $S \sim R_G^2$ ), который, по нашей модели, уменьшился втрое (от 3.5 до 1.2 тыс. км) за 4.5 млрд. лет эволюции Земли. Очевидно, что величина  $p_m$  уменьшится при этом примерно в 10 раз, что весьма похоже на наблюдаемое уменьшение величины геомагнитного поля. Таким образом, и качественно, и количественно, наша модель не противоречит экспериментальному факту уменьшения величины  $p_m$ .

*Скорость вращения.* О вращении Земли известно с тех пор, как Коперник предложил гелиоцентрическую систему, принципиально отличающуюся от системы мира Птолемея. Однако ещё Гиппарх во втором веке до нашей эры нашел, что земная ось перемещается вокруг оси эклиптики, обеспечивая прецессию. В 1737 г. Дж. Брайлей открыл явление нутации - колебания оси вращения Земли, которые накладываются на прецессионное движение. В 1758 г. Л. Эйлер разработал теорию вращения абсолютно твердой Земли вокруг оси главного, полярного момента инерции  $C$ , при условии отсутствия моментов внешних сил. Частота эйлеровой прецессии  $w_E = (C - A)^{-1} r_o / A$ , где  $A$  - экваториальный момент инерции,  $r_o$  - имеет размерность (сутки)<sup>-1</sup>. Период прецессии Эйлера составляет 305 суток. В действительности, Земля не абсолютно твердое, а упругое, деформируемое тело и поэтому в спектре вращения Земли эйлеровой прецессии не наблюдается. В 1892 г. С. Чандлер обнаружил в спектре движения полюса вращения Земли вокруг оси инерции период, равный примерно 428 суток ( $\approx 14$  месяцев). Это 14-месячное колебание названо в его честь чандлеровским периодом, а сами колебания чандлеровскими. Американский астроном С. Ньюком показал, что чандлеровский период, это тот же период Эйлера для упругой Земли.

В настоящее время хорошо известно, что чандлеровский период не остается постоянным во времени - он флуктуирует, отклоняясь от среднего не более  $\pm 4$  %. По-видимому, это вызвано вариацией параметров Земли: жесткости, степени сжатия и т.п. Известно также, что период чандлеровского движения и его амплитуда пропорциональны друг другу (коэффициент корреляции 0.88), причем увеличение периода чандлеровских колебаний коррелирует с уменьшением амплитуды этих колебаний (Мельхиор, 1968).

Несмотря на почти вековую историю исследований чандлеровских колебаний, природа их остается загадкой. Так, например, до сих пор по этому поводу высказываются совершенно различные, подчас противоположные друг другу, мнения. Л. Мансина и Д.Е. Смайли в 1967 г. выдвинули предположение о том, что чандлеровские колебания возбуждаются при землетрясениях (Стейси, 1972). Ранее, обсуждая эту проблему, У. Манк и Г. Макдональд (1964) такой механизм не считали возможным. Оценки порядков величин изменения моментов инерции, подтверждают неприемлемость этого предложения. По мнению Ф. Стейси (1972), корреляция между землетрясениями и малыми движениями оси вращения представляется парадоксальной. Попытки объяснить природу чандлеровских колебаний атмосферными флуктуациями и магнитосферными вариациями, вызванными изменениями интенсивности потока солнечного ветра, показали, что эти явления на много порядков, меньше момента, необходимого для поддержания чандлеровских колебаний. Стейси предполагает, что существует какой-то механизм возбуждения колебаний, о котором мы совершенно не подозреваем.



Из астрономических наблюдений известно, что в настоящее время вращение Земли замедляется за счет приливного трения, увеличивая длину суток примерно на 1.5 мс за 100 лет. Известно, что примерно две тысячи лет тому назад скорость замедления  $1/w \cdot dw/dt$  была примерно в два раза выше - около 3 мс за 100 лет, или  $= 4 \times 10^{-22}$  рад/с<sup>2</sup>. Однако такое замедление вращения Земли представляет собой тренд, на фоне которого происходят как сезонные колебания скорости вращения Земли порядка  $\Delta w/w \leq 10^{-8}$ , так и долгопериодные изменения того же порядка. Скорость вращения Земли наименьшая в апреле и ноябре, а наибольшая - в конце января и июле. Принято считать, что главная причина сезонной неравномерности вращения Земли, это атмосферная циркуляция. Атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад - дуют западные ветры, а в умеренных и высоких широтах - с запада на восток. Момент импульса ветров: восточных - отрицателен, а западных, - положителен. Сезонная неравномерность состоит в перераспределении моментов импульса, причем, момент импульса восточных ветров в несколько раз меньше момента импульса западных.

Можно обсуждать другие причины сезонной неравномерности вращения, например, астрономическую, когда учитывается перекачка импульса из вращательного движения в поступательное и наоборот. Или изменение скорости вращения за счет сезонной зависимости величины океанических приливов, возмущающих форму Земли наиболее сильно и т.п. (Кузнецов, 1990). Хорошо известна взаимосвязь скорости вращения Земли с явлениями Эль-Ниньо. Это явление связано с переменной направления течений в Тихом океане. Наиболее сильное возмущение величины  $w$  за счет этого явления наблюдалось на рубеже 1982-83 г.г. (более подробно в Главе IX).

Изменения  $\Delta w/w$  должны коррелировать с вариацией силы тяжести  $\Delta g/g$ , однако, до внедрения в практику гравиметрического мониторинга криогенных сверхчувствительных гравиметров, этого обнаружить не удавалось. После постановки таких приборов в некоторые обсерватории, синхронные вариации  $\Delta g/g$ , в частности, чандлеровский период в гравитационном поле Земли, были зафиксированы.

Поиски корреляции долгопериодных вариаций скорости вращения Земли с различными геофизическими явлениями постоянно занимали особое место в работах по физике Земли. В частности, речь шла, например, о связи  $\Delta w/w$  с сейсмичностью Земли. Считалось, что такая связь распространяется на глубоководные землетрясения, а неглубокие землетрясения со скоростью вращения не связаны. Многие пытались найти взаимосвязи  $\Delta w/w$  с вариацией магнитного поля Земли, с амплитудой и длительностью чандлеровского периода, с вулканизмом и т.д. Несколько лет тому назад считалось, что такие корреляции вполне достоверны. Однако жизнь показала (в том числе и наши исследования), что значимых корреляций в действительности нет. Все геофизические параметры не имеют простой прямой связи с вариацией величины скорости вращения, хотя утверждать обратное, что на них не оказывает никакого влияния вращение Земли, тоже нельзя.

Принято считать, что Земля раньше вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В доказательство этому, в физике Земли обычно ссылаются на данные по продолжительности года, суток, периода лунных приливов и т.п., по анализу кольцевых наростов и подсчету темно- и светлоокрашенных серий слоев известковых скелетов на срезах ископаемых кораллов, моллюсков и раковин. Чередование различно окрашенных слоев связывается с развитием скелета моллюска и изменением физико-географических условий его обитания и сопоставляется с годовыми кольцами деревьев. По поводу этой методики у специалистов нет ясного и однозначного мнения, насколько достоверны подсчеты колец на срезах древних моллюсков. Литература по этим вопросам очень обширна. Сошлемся на работу В.Н.Сакса с сотрудниками (Козлова и др., 1973), которые считают, что наблюдаемые слои в какой-то мере все же отражают суточные колебания жизнедеятельности животных в течение года, но не все суточные слои или пары слоев видны в разрезе достаточно четко и поддаются подсчету. В качестве аргумента авторы

приводят результаты исследования современных коралловых полипов, у которых даже годовые слои не всегда четко выражены и легко могут быть пропущены. В ещё большей степени это может проявляться в крайне тонких суточных слоях нарастания. Таким образом, к данным, полученным по анализу древних кораллов, моллюсков и пр., следует относиться весьма осторожно. Вероятно, это можно отнести и ко всем другим методам, основанным на расшифровке “каменной летописи” Природы. Грамотно прочесть их - пока проблема.

На рис. 3-9 приведены данные измерений длительности суток, полученные по кораллам (Wells, 1963; Berry and Barker, 1975; Pannela, 1972; Longer., 1996; Sonett et al., 1996; Zahnle, Walker; 1987). На рисунке изображена зависимость изменения длительности периода  $T$  обращения Земли вокруг оси от времени эволюции. Кривая построена по нашей модели. Точки – эксперимент. Последняя точка для 900 млн. лет опубликована в журнале *Astronomy* (Longer., 1996). Из рисунка следует, что оценка величины  $T$  полученная при подсчете слоев кораллов не противоречит модели. Заметим, что в данном случае мы использовали закон сохранения вращательного момента Земли. Учет влияния Луны должен привести к ещё большему расхождению модели и данных, полученных по кораллам. Дело в том, что обычно полагают, что момент вращательного импульса сохраняется:  $0.33MR^2\omega = const$ , однако, учет перераспределения вращательного момента Земли с Луной дает:

$$0.33 MR^2\omega + [M'm/(M+m)]\times L^2 \omega_1 = const, \quad (3.17)$$

где  $m$  - масса Луны,  $L$  - расстояние до Луны, а  $\omega_1$  - скорость её вращения. Учет второго члена уравнения приводит к уменьшению длительности периода вращения Земли. Можно ли считать, что выявленное несоответствие модели и данных по кораллам показывает несостоятельность модели горячей Земли? Полагаю, что отвергать модель на этом основании нельзя.

Обратимся к формуле (3.15), из которой следует, что если в результате эволюции Земли её радиус будет увеличиваться, то скорость вращения должна уменьшаться ( $j \approx GM/R + W^2R^2/2$ ). Соответственно, должна наблюдаться зависимость:  $T \sim 1/W \sim R(t)$ .

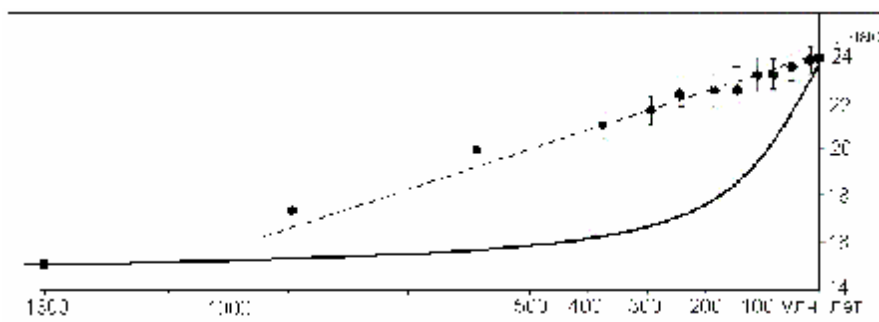


Рис. 3-9. Изменение скорости вращения Земли по нашей модели и данным по кораллам и строматолитам (ссылки в тексте).

Более того, в 2003 г. в средствах массовой информации, в частности, в сети Интернет (Земля замедляет, 2003) и агентства Синьхуа (Xinhuanet, 2003), появилась новая информация о палеовращении Земли. Согласно этой информации (не получившей пока подтверждения в научных публикациях) китайские ученые из Тяньцзиньского института геологии и минеральных ресурсов Zhu Shixing и др., на основе анализа напластований строматолитов, обнаруженных в древних пластах горы Яньшань, показали, что 1.3 млрд. лет тому назад Земля вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В сутках ранней Земли было всего 15 часов (см. рис 3-9). Если этот результат подтвердится, будет признан научной общественностью и опубликован в научном журнале, то его можно считать прямым доказательством правомерности модели горячей Земли. Согласно модели (рис. 3-

9) длительность суток в этот период эволюции должна действительно составлять примерно 15 часов. Это соответствует радиусу Земли равному  $\approx 4$  тыс. км.

Вращение Земли монотонно замедляется. Этот факт никто не подвергает сомнению. Можно ли считать, что скорость замедления всегда была такой, как сейчас? Можно ли предложить какой-либо тест, с помощью которого внести определенность в эту проблему? Оказывается, что такой тест имеется, он состоит в выяснении характера поведения во времени системы Земля - Луна. Известно, что в настоящее время Луна, за счет диссипации энергии вращения океаническими приливами, удаляется от Земли со скоростью 3.3 см/год. Если проследить эволюцию системы Земля - Луна во времени назад, то оказывается, что в прошлом Луна была гораздо ближе к Земле, чем сейчас. При этом, очевидно, предполагается, что и скорость замедления Земли, и скорость удаления Луны, были такими же, как в настоящее время. Линейная экстраполяция полученных оценок в прошлое дает изменение радиуса орбиты Луны  $L$  за время  $4.5 \times 10^9$  лет, равное  $1.5 \times 10^5$  км, что составляет почти половину современного значения величины  $L$ . Тот факт, что амплитуда прилива, а, следовательно, и скорость замедления вращения и скорость удаления Луны пропорциональны  $1/L^3$ , значительно увеличивает скорость замедления. Так, например, согласно модели Гестенкорна (Стейси, 1972), когда Земля и Луна располагались очень близко друг от друга, на расстояниях, несколько больших предела Роша, орбита Луны была почти полярной. Это происходило примерно  $1.78 \times 10^9$  лет тому назад. До этого времени Луна должна была двигаться по орбите в направлении противоположном нынешнему. Надо сказать, что перенос в прошлое современной скорости удаления Луны приводит к парадоксальной ситуации (Кузнецов, 1990). Выходом из неё многие считали отказ от такого переноса. В оправдание приводились аргументы относительно того, что современные океаны возникли сравнительно недавно и таких приливов, тормозящих Луну, раньше не было. По-видимому, в этом есть некий здравый смысл. По крайней мере, этот тезис не противоречит нашей модели горячей Земли. Скорее всего, Луна всегда находилась на расстояниях от Земли, если и меньших, чем современное, то не настолько, чтобы "заставлять" её вращаться в противоположную сторону и приближаться к Земле на опасное расстояние порядка предела Роша. Проблема практически снимается, если учесть, что на Земле в более ранние эпохи не было современных океанов, а, следовательно, не было и такого приливного торможения Луны, как сейчас.

### III. 3. 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 3.3.

Таблица 3.3. Модули упругости (GPa) и коэффициент Пуассона железа (при высоком давлении и температуре) и внутреннего ядра Земли.

|   | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{13}$ | $C_{33}$ | $C_{44}$ | $C_{66}$ | $K$  | $\mu$ | $\sigma$ |                  |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|-------|----------|------------------|
| 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 3.3 приведены величины модулей железа (Mao et al., 1998) измеренные при давлении 211 ГПа и плотности железа  $r = 12.8 \text{ г/см}^3$ . 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. 3-10). Авторы наблюдали в железных образцах сильную решеточную анизотропию напряжения. Коэффициент Пуассона определен по величинам  $V_P$  и  $V_S$ .

Во второй строке Таблицы 3.3 приведены рассчитанные упругие модули для h.c.p. железа при  $r = 13 \text{ г/см}^3$  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  $m$ , эти модули преобразовывались в адиабатические постоянные. Оценка авторами коэффициента Пуассона  $s$  (при  $T = 5700 \text{ К}$ ) показала хорошее совпадение с величиной этого параметра, принятой для вещества внутреннего ядра.

В третьей строке Таблицы 3.3 приведены оцененные нами модули упругости вещества внутреннего ядра. Здесь принято, что скорость Р-волн, равная 11.2 км/с (рис. 3-10) соответствует:  $V_P'' = (C_{11}/r)^{1/2}$ . 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 ( $\sigma$ ) во внутреннем ядре анизотропией не обладает, тогда, полагая, что  $s = 0.44$ , величина скорости  $V_S' = 3.7 \text{ км/с}$ . Принимая

плотность внутреннего ядра  $r \approx 13 \text{ г/см}^3$ , получаем величины модулей упругости внутреннего ядра, приведенные на третьей строчке Таблицы 3.3. В этой строке пропущено значение модуля  $C_{13}$ . Оценить его величину можно было бы по формуле (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/b = K = [(C_{33} (C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2) / C_S], \quad (3.18)$$

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 3.3.

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 3.3, 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:  $\nu \rightarrow 0.5$ . 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 при изменении величины давления 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  $\approx 12.2 \text{ км/с}$ . Этот факт так же ставит под сомнение тезис относительно наличия кристаллического железа во внутреннем ядре.

Анализ данных, приведенных в Таблице 3, 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 РКЖР-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 Р-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.

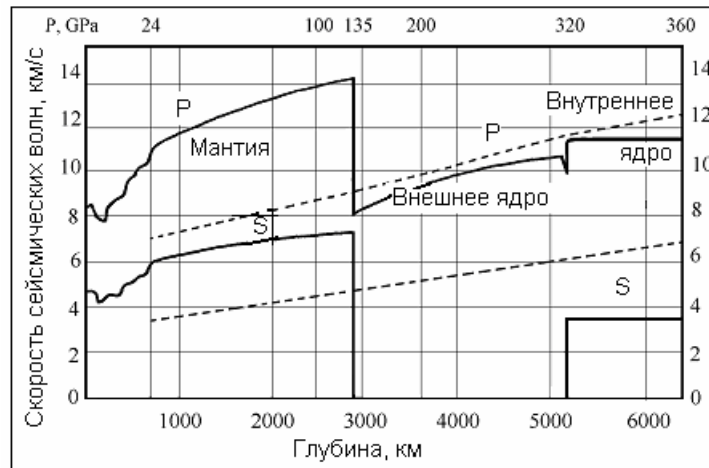


Рис. 3-10. Распределение скоростей сейсмических Р- и S-волн: по глубине Земли (Джеффрис, 1960) – сплошные линии, в железе, от давления при статическом сжатии (Мао et al., 1998) – прерывистые линии.

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,  $T^II > T^I$ . 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:  $dS = dQ(1/T^I - 1/T^II)$ . Здесь  $dQ > 0$  - количество тепла полученного фазой I от фазы II. Так как  $dS$  величина положительная (энтропия возрастает), а  $(1/T^I - 1/T^II) > 0$ , то:

$$dQ = c_V dT + L_T dV - U_{TV} dx$$

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),  $x$  - степень полноты реакции (Пригожин, 2001). Для стационарных условий, когда  $dT = dV = 0$ :  $dQ \sim -U_{TV} dx$  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  $1539^\circ\text{C}$ , температура кипения  $2872^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость  $c_p = 641\text{ Дж/кг К}$ , теплота плавления  $U_{\text{п}} = 13.77\text{ кДж/моль} \approx 0.25\text{ кДж/г}$ , теплота испарения  $U_{\text{и}} = 350\text{ кДж/моль} \approx 6.25\text{ кДж/г}$ , критическая температура  $T_c = 9600\text{ К}$ , критическое давление  $p_k = 8.25 \cdot 10^8\text{ Па}$ , критическая плотность  $\rho_k = 2.03\text{ г/см}^3$ . Воспользуемся этими данными при построении фазовой диаграммы железа (см. рис. 3-11). Зависимость температуры плавления железа при высоких давлениях от 50 ГПа до 200 ГПа хорошо изучена экспериментально (кривая 1 на рис. 3-11), 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,  $T_p \approx 20\ 000\text{ К}$ . При увеличении давления  $p$  и сжатии вещества, растет и температура:  $T_p \sim p/r$  ( $r$  - плотность). Предельное значение величины  $T_p$ , ( $T_p \sim U_w/R_g$ ) железа (Зельдович, Райзер, 1966) оказывается порядка  $70\ 000\text{ К}$ . 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  $p \approx 360\text{ ГПа}$  (кривая 2 на рис. 3-11). Надо заметить, что линия плавления вещества мантии Земли ( $\text{MgO}$ ) примерно соответствует линии плавления железа, но шкала температур в этом случае выше на  $1000\text{ К}$ . Этим можно воспользоваться при построении кривых равновесия фаз вещества Земли. Принципиальных различий с кривой железа быть не должно.

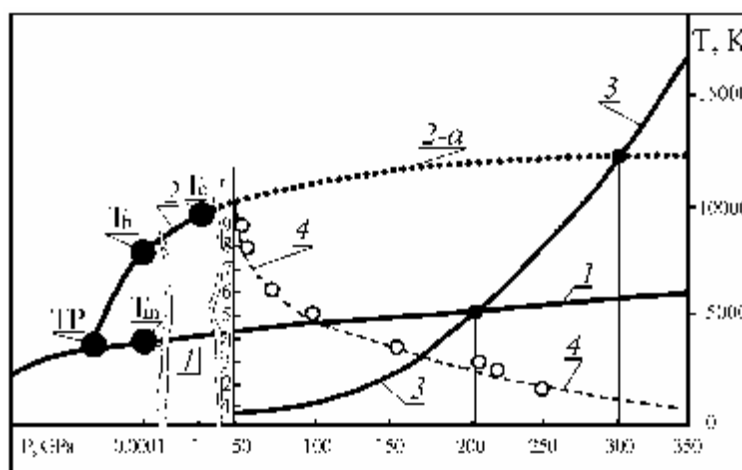


Рис. 3-11. Фазовая диаграмма железа: 1 - линия «плавление – кристаллизация» (Boehler, 2000); 2 - линия «испарение – конденсация», 2-а – продолжение 2 для  $T > T_c$ . Ударная адиабата 3 - вещества ядра, согласно модели горячей Земли, 4 - зависимости давления в ударной волне от радиуса шара ( $dp/dr$ ) 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  $h = 100\text{ км}$ . 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:

$$(pV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, c_p/c_v = \gamma); (\mathcal{J}T/\mathcal{J}p)_S = T/c_p (\mathcal{J}V/\mathcal{J}T)_p, \quad (3.19)$$

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):

$$\begin{aligned} e_1(p_1 V_1) - e_0(p_0 V_0) &= 1/2 (p_1 + p_0) (V_0 - V_1), \\ w_1 - v_0 &= 1/2 (p_1 - p_0) (V_0 + V_1), \\ v &= (e + pV). \end{aligned}$$

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:

$$e = c_v T = pV/(\gamma - 1); v = c_p T = \gamma/(\gamma - 1) pV,$$

решаем уравнения относительно температуры  $T_1$ :

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

На рис. 3-11 (кривая 3) изображена зависимость  $dT/dp$ , построенная по адиабате Гюгонио:

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

здесь  $\Gamma$  - 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  $s$ :

$$s = 1/2 (3K - 2m) / (3K + m) = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2). \quad (3.20)$$

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

$s_{xx} = s_{yy} = p s / (1 - s)$ , 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 (Мао 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 (Мао et al., 1998), должен оставаться таким вплоть до давления, характерного для центра Земли (линия 2 на рис. 3-12). Эта линия практически совпадает с линией 1, показывающей ход коэффициента Пуассона в мантии Земли, и в целом по Земле, где величина  $\nu$  равна 0.5 во внешнем ядре, и  $\nu = 0.45$  - во внутреннем ядре. Величина коэффициента Пуассона ( $\nu = 0.45$  - 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 ( $\nu = 0.45$ ) нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без привлечения идеи частичного плавления железа из-за громадного давления в центре Земли, что находится в противоречии с экспериментом (Мао et al., 1998).

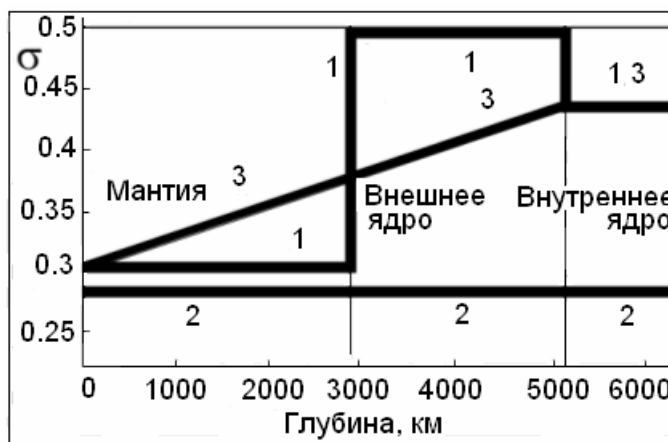


Рис. 3-12. Коэффициент Пуассона  $\sigma$ : 1 - Земли, 2 - железа (Мао et al., 1998), 3 - железа по данным (Brawn, McQueen, 1986; Steine-Neumann et al., 2001).

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 рис 3-12). 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.

*Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной.* Рассмотрим результаты экспериментов по нагружению образца стали сферической ударной волной (Зельдович и др., 1995). Стальной шар диаметром 40 мм был окружен 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. 3-13) 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.

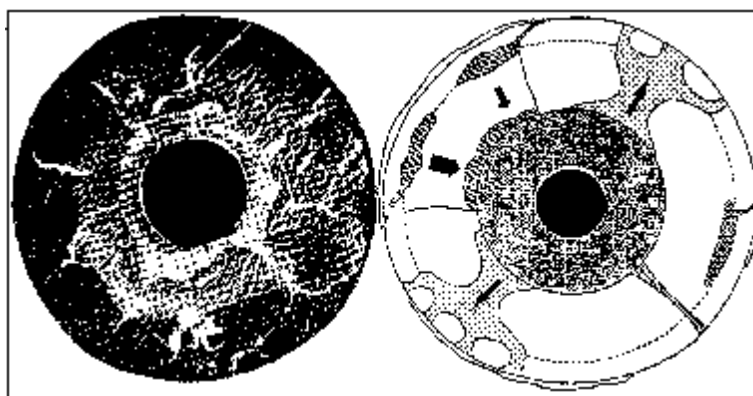


Рис. 3-13. Фотография разреза центральной части железного шара после нагружения ударной волной (Зельдович и др., 1995) - слева; справа - схема внутреннего устройства и глобальной геодинамики Земли (Лобковский, Котелкин, 2000).

Авторы измерили распределение микротвердости  $H_m$  стального шара от расстояния  $r$  и давления  $p$  до центра (рис. 3-14-а). Твердость стали до нагружения, равна  $220 \text{ кг/мм}^2$ . 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. 3-14-b). Ниже, для сравнения, приведено распределение скоростей Р волн в нижней мантии и ядре Земли в трактовке Джеффриса (1960) (рис. 3-14-с). Рисунки 14-b и 14-с имеют общность, что может служить формальным подтверждением правомерности аналогии между стальным шаром, после нагружения его ударной волной, и внутренним строением Земли.

Совпадение рисунков 3-14-b и 3-14-с, по-видимому, не случайно. Наличие довольно резких изменений величины  $H_m$  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  $M_{ев} \approx 2 M_{ш} U_u / E_{ев}$ , где:  $E_{ев}$  – эффективность взрывчатого вещества ( $E_{ев} \approx 4$  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  $M_{ев}$  оказывается порядка одного кг, в то время как в эксперименте применялось около 300 г.

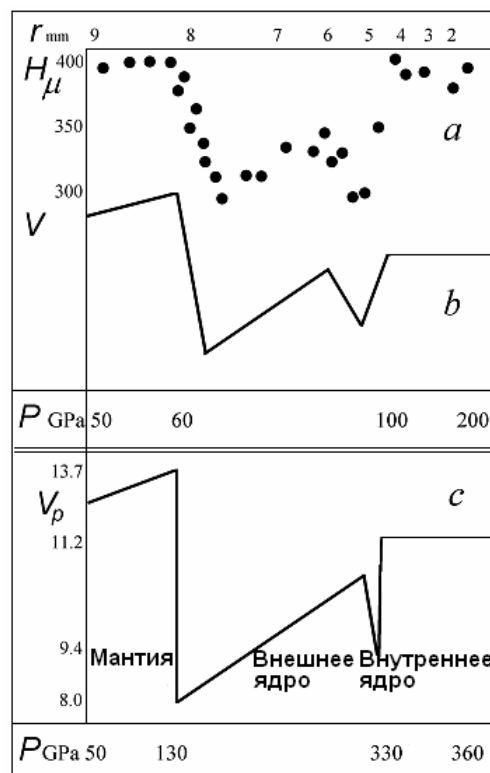


Рис. 3-14. **a** - зависимость микротвердости  $H_m$  стального шара от радиуса  $r$  и давления  $p$  в сферической сходящейся ударной волне (по данным Зельдович и др, 1995); **b** - зависимость скорости акустических волн (в отн. ед.):  $v \sim (H_{\mu})^{1/2}$  от величины давления в ударной волне; **c** - скорость Р 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  $M_{\text{ж}}$  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  $(gRT/m)^{1/2}$ , где  $m$  – 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. 3-11, 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 (*b*) 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 *b*-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  $\zeta = 10^{-2}$  (см<sup>2</sup>/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.

*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, 1998, 2001; Merlini 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:  $k = \exp(-R/l)$ , где  $l = (kT/4\pi ne^2)^{1/2}$  - 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; Lamogeaux 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  $f_C = -(\pi^2/240)(hc/R^2)$ , 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 (Lamogeaux, 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:  $U = N\phi$ , где  $N$  – число пар пылевых частиц, а  $\phi$  – 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:  $j = \sum j_{ij}$ , где  $j_{ij}$  - сумма потенциала сил кулоновского отталкивания и потенциала сил Казимира  $f_c$ , отвечающего за притяжение пылевых частиц:  $j_{ij} = f_c/R_{ij}^n - e^2/R_{ij}$ . Подставляя известные значения величин, потенциал ПКП:

$$j = \pi^2 hcS/240R^3 - [(Ze)^2/R] \exp(-R/I). \quad (3.21)$$

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

$$1/b = Vd^2U/dV^2 = V[dU/dR \cdot d^2R/dV^2 + d^2U/dR (dR/dV)^2]. \quad (3.22)$$

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

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

и, отсюда:

$$d^2U/dR^2 = N [12\pi^2 hcS/240R^5 - [2(Ze)^2/R^3] \exp(-R/I)]. \quad (3.23)$$

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

$$dU/dR = N[-3\pi^2 hcS/240R^4 + [(Ze)^2/R^2] \exp(-R/I)] = 0, \\ \exp(-R/I) = \pi^2 hcS/80R^2 (Ze)^2.$$

подставляя, получаем выражение второй производной от энергии по объёму

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

тогда сжимаемость ПКП равна:

$$1/b \gg 10^{-3} \pi^2 hcS/R^6. \quad (3.24)$$

Оценим применимость полученной формулы (3.24). Легко показать, что условие  $f_c = f_e$  выполняется при:  $R \gg I \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow 1$ , что не всегда соответствует большинству современных экспериментов с пылевой плазмой, в которых наблюдается:  $R \gg I \gg (S)^{1/2}$  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 ( $1/b$ ) металлов (Михайлов и др., 1964):  $1/b = A(Ze)^2/18 R^4$ , где  $A$  - постоянная Маделунга. Заменим в нашей формуле  $hc = e^2/a$ , здесь  $a$  - постоянная тонкой структуры, которая характеризует электромагнитное взаимодействие ( $a = 1/137$ ), и получим:  $1/b \gg \pi^2 (Ze)^2/10^3 aR^4$  (полагая  $S \gg R^2$ ), 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  $Z$ :  $V'_P = (C_{33}/r)^{1/2}$ ,  $V'_S = (C_{44}/r)^{1/2}$  и распространяющихся поперек оси  $Z$ :  $V''_P = (C_{11}/r)^{1/2}$ ,  $V''_S = ((C_{11} - C_{12})/2r)^{1/2}$ .

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

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

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

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 (3.24).

Сделаем оценку модуля упругости ПКП для типичного эксперимента с пылевой плазмой. При размере пылинки 0.01 мкм ( $S = 10^{-12}$  см<sup>2</sup>) и расстоянии между ними  $R = 10$  мкм, величина сжимаемости  $1/b \approx 10^{-12}$  дин/см<sup>2</sup>. Принимая плотность ПКП равной  $10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>, 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  $\approx 50$  микрон, а газовый разряд помещен в продольное магнитное поле  $\approx 100$  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:  $R \approx I \approx 0.8$  мм;  $Q = Ze \approx 10000 e$ ; масса пылинки  $m = 5 \cdot 10^{-10}$  г; диаметр 8.7 микрон. Авторы измерили скорости волн сжатия и сдвига в пылевой лабораторной плазме:  $C_L = 24.2 \pm 1.7$  мм/с и  $C_T = 5.4 \pm 0.5$  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:

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

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  $\rho$  ( $\rho \approx 5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>), можно оценить модуль сжатия  $1/b$ :  $K = 1/b \approx V_P^2 \times r \approx 5 \cdot 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup> и модуль сдвига:  $\mu \approx V_S^2 \times r \approx 0.25 \cdot 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup>.

Для сравнения, оценим  $K$  по формуле (3.24), полагая:  $Z \approx 10000$ ,  $e \approx 4.8 \cdot 10^{-10}$  CGSE,  $(Ze)^2 \approx 2 \cdot 10^{-11}$ ,  $R = 0.08$  см. Величина  $K = 1/b \approx 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup>.

Как видно,  $K$  из эксперимента, и  $K$ , полученный по формуле (3.24), по порядку величины совпадают. Здесь предполагалось выполнение условия  $S \gg R^2$ . Эти расчеты позволяют оценить порядок величины  $K$  для вещества внутреннего ядра, или, точнее, полагая, что  $K = 1/b \approx 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>, оценить характерные размеры  $R$  элементарной кристаллической ячейки (аналога пылевой частицы). Предполагая, что формула (3.24) справедлива и в области мегабарных давлений, характерный размер  $R$  можно оценить приближенно таким образом:

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

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  $3 \text{ \AA}$ . (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:

$$j \sim 1/R \exp(-R/I_B), \quad (3.25)$$

где  $I_B$  - (как и в нашей работе) дебаевский радиус экранирования. В потенциале Юкавы  $I_B$  - это комптоновская длина волны промежуточного (виртуального) бозона. Для миллиметровой области действия, примерно соответствующей нашей модели, масса бозона с  $I_B \sim 1 \text{ мм}$ ,  $m_B \leq 10^{-4} \text{ эВ}/c^2$ . 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 (3.24) для оценки упругости пылевой плазмы применима при выполнении условия:  $R \gg I \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow 1$ . Это условие ближе всего соответствует соотношениям, характерным для шаровой молнии, где вместо пылинок рассматриваются капли воды, размер которых  $< 1 \text{ мкм}$ , а расстояние между каплями  $R \approx 5 \text{ мкм}$ . 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 ( $a_S$ ) обязано наличию силы Казимира, то можно оценить эту величину:  $a_S = fc/r$ ,  $r$  - радиус шаровой молнии. Подстановка известных констант, величин  $S$ ,  $R$ , и  $r = 5 \text{ см}$ , дает величину  $a_S \approx 10^{-5} \text{ дин}/\text{см}$  ( $a_S$  воды  $70 \text{ дин}/\text{см}$ ).

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

*«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  $m \approx 10$ . Мы уже отмечали, что  $m \approx 10$  может быть получен, если вещество состоит из железа ( $m \approx 56$ ) и водорода ( $m \approx 1$ ) 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. В Таблице 5.3 (V глава) приведены относительные 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. гл. II), 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  $m \approx 10$ . Будем полагать:  $m = 1/n \sum N_i n_i$ , что для Fe + S + Si + Mg;  $n = 1 + 5 + 8 + 6 = 12$ ;  $\sum N_i n_i = 1 \cdot 56 + 5 \cdot 32 + 8 \cdot 28 + 6 \cdot 24 = 584$ ; отсюда получаем  $m$  тяжелого элемента (ТЭ) =  $584/20 = 19$ . Выясним, что представляет собой ТЭ:  $m(C + O + TЭ) = \sum N_i n_i = 12 \cdot 126 + 16 \cdot 250 + 19 \cdot 20 = 1512 + 4000 + 584 = 6096$ .  $m$  всех элементов без водорода =  $6096/396 = 15.4$

Для того чтобы  $m = 10$ , количество атомов водорода  $\approx 237$ :  $m \sim (6096 + 237) / (396 + 237) = 6333/633 = 10$  (количество нуклонов, деленное на количество атомов). Если  $m < 10$ , 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  $\text{см}^3$  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  $1 \text{ \AA}$ .

При температуре  $\sim 3 \text{ эВ}$  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 (см. рис. 1-2, гл. I) 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 3.3 (см выше). Напомним, что в

первой строке Таблицы 3.3 приведены модули железа, измеренные в прямом эксперименте по статическому сжатию монокристалла гексагонального (h.c.p.) железа (Мао 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 (Мао et al., 1998) величина  $\sigma$  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 3.4). 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 3.4

|       | 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. 3-15). 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:  $181 \cdot 1.6 \cdot 10^{-24}$  г =  $290 \cdot 10^{-24}$  г. При плотности внутреннего ядра  $\rho = 13$  г/см<sup>3</sup>, её объем  $V = 22 \cdot 10^{-24}$  см<sup>3</sup>. Полагая расстояние между узлами основания решетки равным  $a$ , высоту решетки  $\approx 1.5 a$ , её объем  $V \approx 4 a^3$ , ( $a \approx 1.75$  Å), а высота решетки  $\approx 2.6$  Å.

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

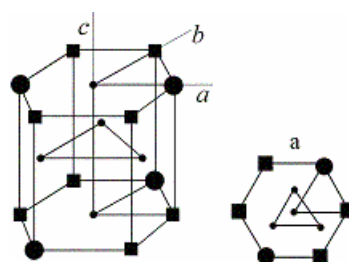


Рис. 3-15. Возможная объемная конфигурация ячейки кристаллической, плазменно-пылевой структуры вещества внутреннего ядра Земли.

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?

III. 4. Принцип минимизации гравитационного потенциала - основной закон эволюции планет.

*Основные соотношения.* Гравитационный потенциал  $j$  удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta j = -4\pi Gr. \quad (3.26)$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная,  $r$  - плотность вещества. Решение уравнения (3.26) записывается в виде:

$$j = G \int (rdV)/r + C, \quad (3.27)$$

$r$  - расстояние между элементом объема  $dV$  и точкой, в которой определяется потенциал  $j$ ,  $C$  – постоянная. Потенциал  $j$  определим и интеграл (3.27) сходится в том случае, когда при  $r \rightarrow \infty$ ,  $r$  убывает быстрее, чем  $r^{-2}$ . Если  $r = const$ , то интеграл (3.27) расходится и состояние формы гравитирующего шара оказывается неустойчивым.

Потенциал притяжения  $rj$  является функцией, регулярной на бесконечности, т.е.  $\lim (rj)_{(r \rightarrow \infty)} = GM$ , при этом сама функция  $j$  стремится к нулю:  $\lim j_{(r \rightarrow \infty)} = 0$ . Принято представлять потенциал силы тяжести реальной Земли  $w(x, y, z)$  как сумму:

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z), \quad (3.28)$$

где  $j(x, y, z)$  - потенциал сфероида, а  $\chi(x, y, z)$  – возмущающий потенциал, т.е. часть потенциала, связанная с аномалиями силы тяжести. Уравнение (3.29) называется уравнением геоида, где  $T = const$ .

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z) = T. \quad (3.29)$$

Рассмотрим семейство уретенных поверхностей потенциала  $W$ . Предположим, что через некоторую точку проходит уретенная поверхность:  $W(x, y, z) = T$ . Если  $\chi(x, y, z) = 0$ , то уретенная поверхность соответствует нормальному сфероиду  $j(x, y, z) = T$ . Добавим к  $j(x, y, z)$  некий малый потенциал  $\chi(x, y, z)$ . Тогда положение рассматриваемой уретенной поверхности изменится и некая точка  $P$ , находящаяся на этой поверхности, переместится в точку  $P'$ . Расстояние между точками  $P'$  и  $P$  обозначим  $\Delta n$ , тогда:

$$\Delta n = N = -\chi / (dj/dn) = \chi/g, \quad (3.30)$$

где  $g = -dj/dn$  – производная функции  $j$ . Запишем основное уравнение гравиметрии, связывающее аномалии силы тяжести  $\Delta g$  с величиной возмущающего потенциала:

$$\Delta g = 1/g (dg/dn) \chi - dx/dn. \quad (3.31)$$

Уравнения (3.30, 3.31) показывают связь аномалии силы тяжести  $\Delta g$  с величиной возмущающего потенциала  $\chi$  и высотой геоида  $N$ .

Равновесной формой самогравитирующего изотропного тела, обладающего фазовой поверхностью, как известно, является шар. С другой стороны, в соответствии с принципом Гиббса-Кюри, форма шара присуща жидким изотропным телам в отсутствие внешних полей. В этом случае равновесная форма шара определяется минимумом свободной поверхностной энергии:

$$a \int dS = \min, (V = const). \quad (3.32)$$

Здесь  $a$  - поверхностное натяжение,  $S$  - площадь поверхности раздела фаз,  $V$  – объем шара. Приобретение телом шарообразной формы, как в случае самогравитации, так и при проявлении поверхностных эффектов в жидкости, базируются на общем для обоих случаев принципе пространственной корреляции структуры вещества и эффекте возникновения дальнего порядка. Возникновение дальнего порядка (упорядоченной фазы) имеет в физике фундаментальный характер. Как при самогравитации, так и при образовании фазовой поверхности, частицы вещества «чувствуют» не только ближайших к ним соседей, но и весь их «ансамбль». Причиной возникновения дальнего порядка в

самогравитирующей структуре может быть, например, континуальное вращение планеты, или, как показано в (Tsallis, 1999), - негиббсовская термодинамика самогравитирующих структур.

Представим себе, что дальний порядок устанавливается в объеме фазовой границы самогравитирующего тела. Допустим, что слой фазовой границы примерно соответствует земной коре толщиной  $z$ . Предположим, что именно в этом слое реализуется принцип минимизации площади  $S$ . Сила притяжения слоя:  $dF = (GMdM)/r^2$ , его гравитационная энергия  $dE = (GMdM)/r$ . Приравняем гравитационную энергию слоя литосферы толщиной  $z$ , энергии «поверхностного натяжения»:  $(GMdM)/r \approx a \int dS$ .

Отсюда получим выражение принципа минимизации гравитационного потенциала:

$$(GMdM)/r \rightarrow \min. \quad (3.33)$$

Полученное выше равенство позволяет оценить величину  $a$ :

$$a = GMzr/R. \quad (3.34)$$

Подставляя значения для гравитационной постоянной, массы Земли, толщины слоя ( $z \gg 10$  км), плотности литосферы и радиуса Земли, получаем величину  $a$  порядка  $10^{19}$  дин/см.

Принцип минимизации гравитационной энергии планеты и его роль в процессах, происходящих на поверхности планеты, заключается в том, что площадь фазовой поверхности самогравитирующего шара радиусом  $R$  стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Ниже рассмотрим следствия, вытекающие из этого принципа и механизмы его реализации. Обратим внимание на то, что выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Выполнение его приводит к минимизации площади поверхности планеты.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Принцип минимизации “заставляет” планеты стремиться к гидростатическому равновесию. Пути достижения этой цели известны, это геодинамика, сейсмичность и вулканизм.

Сравним: высота гор и самых глубоких впадин составляет примерно  $10^{-3}$  от радиуса Земли, отношение величины максимальных значений гравитационных аномалий, к силе тяжести составляет около  $10^{-4}$ , а отношение высоты геоида, к радиусу Земли -  $10^{-5}$ . Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать даже не величину гравитационных аномалий ( $\Delta g$ ), а высоту геоида ( $\zeta$ ). Иначе, Земля стремится достичь гидростатического равновесия, при котором её равновесная форма (когда высота геоида  $\zeta \rightarrow 0$ ) примет форму эллипсоида, с величиной обратного сжатия  $1/\epsilon = 298$  (а не 232, как следовало бы для “жидкой” Земли) (см. Гл. VII). Очевидно, что для не вращающейся планеты равновесная форма, это шар.

Предположим, что в результате растекания литосферы, как следует из нашей модели (см. Гл. VII), или “встряхивания” Земли при помощи её собственных землетрясений, с целью сделать Землю более компактной, как это следует из серии статей Чао и Гросса, реальный радиус Земли уменьшился на 6 мм (на  $10^{-9}$  его часть). Так как полная гравитационная энергия Земли составляет  $2 \times 10^{39}$  эрг, то такое уменьшение эквивалентно “выделению”  $2 \times 10^{30}$  эрг “реактивной” энергии. Какая часть этой энергии может быть затрачена на диссипативные процессы, сказать однозначно пока трудно, но такую возможность исключать нельзя. Вполне возможно, что часть из “выделившейся” таким способом энергии, может быть потрачена на дальнейшее уменьшение земного радиуса и еще большее увеличение доли этой энергии.

Заметим, что принцип минимизации обязан “работать” не только на Земле, но и на других достаточно крупных космических объектах. Вполне возможно, что процесс выделения диссипативной энергии является причиной вулканизма и сейсмичности Марса, Луны, Ио и др. Т.е. он, возможно, является источником энергии на тех планетах и спутниках, на которых уже давно нет внутреннего ядра с его колоссальным запасом энергии.

Для того чтобы понять, как работает принцип минимизации, обратимся к структуре Земли и особенностям строения её оболочек. Воспользуемся данными по собственным колебаниям оболочек и пространственному распределению их splitting-функций. На рис. 3.16 изображено изменение параметров Земли, полученное по анализу этих функций во внутреннем G-ядре (на границе его с внешним), мантии (D''- слое) в виде сечений по экватору, и по “нулевому” меридиану. На этих же рисунках представлены данные по изменению высоты геоида  $\zeta$  (в тех же сечениях). Для ещё большей наглядности, переведем данные по splitting-функциям, которые обычно представлены как изменение скоростей сейсмических волн (в процентах), в расстояния. Под расстояниями будем понимать вариации радиуса соответствующей оболочки от некоего среднего значения. Используем для этого известные значения градиентов скорости  $dv_p/dR$  в области вариаций splitting-функций. Тогда изменение значений splitting-функций на 1%, при градиенте скорости  $dv_p/dR = 1\text{ км/с} / 100\text{ км}$ , при величине скорости  $v_p = 10\text{ км/с}$ , эквивалентно изменению радиуса Земли  $\Delta R = 10\text{ км}$ .

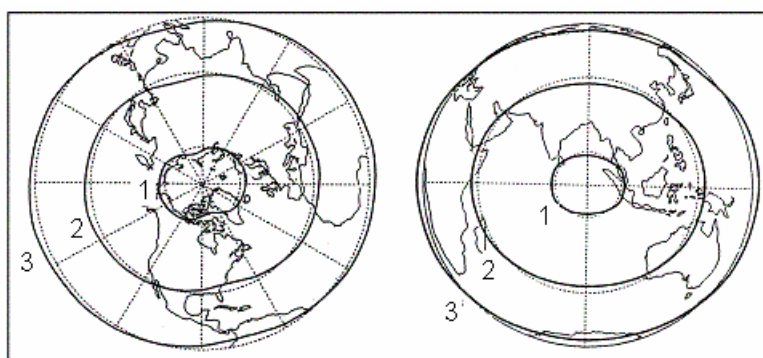


Рис. 3-16. Пространственная структура оболочек Земли полученная по splitting-функциям. 1 - внутреннее G-ядро (на границе его с внешним ядром), 2 - мантия (D''- слой), в виде сечений по экватору (рис. 3-16 - слева), и по “нулевому” меридиану (рис. 3-16 - справа). На этих же рисунках данные по изменению высоты геоида  $\zeta$  (в тех же сечениях) - 3.

Действительно, наши оценки величины цилиндрической анизотропии внутреннего ядра дают примерно такой же порядок (20 км). Примерно такая же величина  $\Delta R$  (20 - 40 км) характеризует колебания splitting-функций на границе ядро-мантия. Для сравнения: как мы отмечали, максимальный разброс значений высот геоида значительно меньше ( $\zeta \approx \pm 60\text{ м}$ ).

Рисунок 3-16 демонстрирует поразительное пространственное совпадение вариаций акустических свойств внутреннего ядра и мантии, а так же высоты геоида. При этом внешнее ядро не обладает таким очевидным совпадением своих акустических свойств с аналогичными свойствами внутреннего ядра и мантии. Этот рисунок показывает очевидную взаимосвязь земных оболочек. Рассматривая этот результат в контексте нашей модели, получаем подтверждение принципиальной возможности постулированной нами взаимосвязи двух фазовых переходов (ФП) “конденсация-испарение” (на границе внутреннего ядра) и “кристаллизация-плавление” (на границе ядро-мантия). Обратим внимание ещё на одну деталь. Пространство, где ФП происходит наиболее интенсивно, проецируются на Тихий океан (в области  $180^\circ$ ), с одной стороны, и Атлантический - Индийский ( $0^\circ$ ), с другой, т.е. на регионы максимального расширения Земли. Сравнивая величины  $\Delta R$  G-ядра и D''-слоя с высотой геоида  $\zeta$ , легко видеть, что высота геоида почти на три порядка меньше (На наших рисунках соотношение этих величин не выдержано). Этот факт свидетельствует о том, что в минимизации гравитационной энергии и высоты геоида принимает участие только самая верхняя часть литосферы, возможно, только земная кора.

Обратимся к механизмам реализации принципа минимизации. Выше мы называли их: это геодинамика, т.е. “течение” - горизонтальный перенос вещества литосферы; вулканизм и сейсмичность. Вулканизм и сейсмичность, в определенном смысле, являются механизмами вертикального (радиального) переноса. При этом либо переносится вещество, что происходит при излиянии вулкана, либо переносится тензор момента - при землетрясении. Легко видеть, что эти механизмы взаимосвязаны, хотя подчас такую связь выявить нелегко. Например, горизонтальный перенос изменяет структуру напряжений части литосферы, что вызывает возникновение землетрясения, которое приводит к перераспределению касательных напряжений, являющихся причиной течения и т.д. Аналогичную цепочку взаимосвязей можно проследить и при взаимодействии: геодинамика – вулканизм - геодинамика. Воспользуемся подходами, развитыми в синергетике. Будем в дальнейшем считать, что горизонтальное течение, - это перенос, а сейсмичность и вулканизм, явления, по своей физике, близкие к “просачиванию” - перколяции. Как принято считать в синергетике, симбиоз взаимодействующих механизмов переноса и перколяции приводит к самоорганизации структуры, в которой проявляются эти механизмы.

*Процессы самоорганизации.* Самоорганизующиеся системы описываются уравнением Фоккера-Планка (Ф-П). Физический смысл решения уравнения Ф-П можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (амплитуда, энергия и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения. Многие сейсмологи склонны считать график повторяемости землетрясений, известный как закон Гутенберга-Рихтера, фликкер-шумом. В этом случае он показывает, что в открытой диссипативной структуре, имеющей целью минимизировать гравитационный потенциал, или, что примерно одно и то же, минимизировать высоту геоида, происходят процессы самоорганизации. Т.о. мы приходим к важному выводу: ***реализация принципа минимизации гравитационного потенциала планеты (высоты геоида) и стремление её к установлению гидростатического равновесия, сопровождается процессом самоорганизации.***

График повторяемости землетрясений описывается известной в сейсмологии формулой:

$$\lg N(M) = a - bM, \quad (3.35)$$

где  $N(M)$  число событий с магнитудой  $M$ , которая однозначно связана с энергией землетрясений  $E$ :  $\lg E \sim M$ . Коэффициент  $b$  имеет смысл хаусдорфовой размерности. В самоорганизующихся процессах, чем ниже размерность, тем выше степень самоорганизации. В этом случае, по-видимому, выше обратная связь и степень взаимодействия между процессами переноса и перколяции.

График повторяемости землетрясений далеко не единственная характеристика такого рода. По-видимому, впервые аналогичную зависимость обнаружили древние египтяне. Анализируя частоту разливов Нила различной интенсивности, они обнаружили, что очень большие разливы встречаются крайне редко. Значительно чаще происходят разливы меньшей интенсивности, ещё меньшей интенсивности – ещё чаще и т.п. Впоследствии зависимости, определяемые формулой, аналогичной (3.35), обнаруживались практически во всех природных процессах, в той, или иной форме, связанных с энергией события. Например, солнечные вспышки, так же как землетрясения, подчиняются закону фликкер-шума, т.е. наблюдается линейная логарифмическая зависимость энергии вспышки, и числа вспышек с этой энергией в определенный промежуток времени. Вспышки, так же как и землетрясения, являются способом «сбросить» избыточную энергию хромосферы Солнца. Во многих работах показано, что если процесс можно свести к прямой в логарифмических координатах, где по осям отложена энергия и частота явлений с заданной величиной энергии, то это характеризует фрактальность процесса, а фрактальная размерность, это угол наклона прямой. Чем выше степень самоорганизации



процесса, тем ниже фрактальная размерность. Фрактальная размерность, это принципиально не целая величина. Наличие такой характеристики в солнечных вспышках говорит о том, что в солнечной короне происходит взаимодействие, по крайней мере, двух взаимосвязанных механизмов, приводящих к возникновению вспышки. В соответствии с теорией самоорганизации Хакена, эти механизмы должны соответствовать гидродинамическому переносу и диффузии.

Аналогичные зависимости наблюдаются в космических лучах, распределении высоты гор (Глава VII), величины нефтяных месторождений (Глава V) и пр. Складывается впечатление, что практически все процессы, происходящие на Земле, - процессы самоорганизации. Это дает основание считать Землю открытой самоорганизующейся планетой.

В третьей главе обосновывается модель горячей Земли, рассмотрены её ключевые моменты:

- Земля образовалась в результате быстрого сжатия её вещества за счет самогравитации. Температура вещества Земли в момент её образования достигала нескольких десятков тысяч градусов. Вещество находилось в газообразном состоянии. Температура вещества планеты, звезды, спутника, - определяется величиной её массы:  $T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p$ .

- В модели горячей Земли её начальный радиус  $R_0$  принят равным 3.5 тыс. км. Величина начальной плотности вещества Земли ( $r_0$ ) могла достигать  $35 \text{ г/см}^3$ .

- В процессе эволюции Земли, её вещество охлаждалось, конденсировалось – образуя внешнее ядро, и кристаллизовалось, – образуя мантию. Радиус Земли в процессе эволюции возрастал пропорционально  $t$ :  $\Delta R \sim t^2$  ( $t$  – время эволюции).

- Зависимость  $\Delta R \sim t^2$  является однозначно обратной:  $h \sim t^{1/2}$  ( $h$  – глубина астеносферы, а  $t$  – время, отсчитанное назад, от современного).

- Данные по изменению в течение времени эволюции таких параметров, как гравитационное и магнитное поле, а так же скорость вращения Земли, не находятся в противоречии с характером их поведения, следующим из модели горячей Земли.

- Модель горячей Земли решает вопрос о физике теплового потока и его равномерном распределении по поверхности Земли.

- Показано, что убывание температуры поверхности Земли связано с уменьшением величины силы тяжести, которое, в свою очередь, определяет толщину атмосферы.

- Из модели горячей Земли следует нетривиальный вывод о том, что Жизнь на Земле может возникнуть только при наличии силы тяжести, следовательно, она не могла быть привнесена на Землю из Космоса.

- Предложена теория, описывающая упругие свойства пылевой кристаллической плазмы на основе использования силы Казимира. Полученная формула позволяет оценить величину модуля сжатия вещества внутреннего ядра Земли.

- Анализ данных по скорости распространения сейсмических волн во внутреннем ядре, величине плотности и анизотропии позволяет оценить величины модулей сжатия ядра Земли. Полученные значения модулей сравниваются со значениями модулей железа, определенными экспериментально и оцененными теоретически. Сравнение показывает, что вещество внутреннего ядра не соответствует упругим свойствам железа.

- Земля подвержена действию принципа минимизации гравитационного потенциала.

Выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Этот принцип приводит к минимизации площади поверхности планеты, минимизации её высоты геоида.

### *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.
- Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- 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.
- Веселов К.Е. Гравитационное поле и геологическое развитие Земли. Советская геология. 1976. N. 5. С. 70-80.
- Веселов К.Е. Случайные совпадения или явления природы. Геофизический журнал. 1981. № 3. С. 50-61.
- Веселов К.Е., Долицкая Т.В. Формирование земной коры континентов с позиций гипотезы расширения Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Веселов К.Е., Карус Е.В., Савинский К.А., Долицкая Т.В. Физико-геологические основы концепции глобального рифтогенеза. М.: МГУ. 1993. 128 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., Пурыгин Н.П. и др. Квазисферическое взрывное нагружение стали с давлением до 200 ГПа. ДАН. 1995. Т. 343. № 5. С. 621-624.
- Земля замедляет свое вращение. 2003. URL: <http://www.webphysics.ru/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=14>
- Игнатов А.М. Квазигравитация в пылевой плазме. УФН. 2001. Т. 171. С. 213-217.
- Козлова Л.Е., Киприкова Е.Л., Найдин Д.П., Сакс В.Н. О природе концентрической слоистости в роствах белемнитов. Геология и геофизика. 1973. № 9. С. 38-49.
- Кренделев Ф.П. Изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли по результатам изучения химического состава костей позвоночных. Геология и геофизика. 1977. № 9. С. 154-157.
- 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. Гравитационное поле Земли в геологическом прошлом. Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 10. С. 98-107.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. Сб. докладов. ИКИР. 2004.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с.
- Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра. 1980. 216 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. Двухъярусная 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.
- Манк У., Макдональд Т. Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.
- Мельхиор П.Ф. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
- Мёрнер Н.А. Эвстазия, изменение геоида и взаимодействия многих геофизических факторов. Сб. Катастрофы и история Земли. М.: Москва. 1986. С. 394-412
- Милуков В.К. Изменяется ли гравитационная постоянная. Природа. 1978. № 6. С. 96-104.
- 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.
- 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.
- Смирнов Л.С., Любина Ю.Н. О возможности изучения изменения силы тяжести с геологическим временем. ДАН СССР. 1969. Т.187, № 4. С. 874-877.
- Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 342 с.
- Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля: введение в общую геологию. Ч. 2. М.: Мир. 1974. 845 с.
- Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы и облака. УФН. 1997. Т. 167. С. 57-99.
- Чумаков Н.М. Климатические колебания и биотические события. Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С.30-39.
- Шмидт-Нильсон К. Как работает организм животного М.: Мир. 1976. 140 с.
- Шульдинер В.И. Свидетели ранней истории Земли. Природа. 1985. № 4. С. 72-79.
- Эванс М.Л., Мур Р., Хазенстайн К.-Х. Как корни растений реагируют на силу тяжести. В мире науки. 1987. № 2.
- Ashpole E. Expanding Earth. Spectrum. 1985. № 193. P. 6-8.
- Berry W.B.N., Barker R.M. Growth increments in fossil and modern bivalves. Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation. Ed. S.K.Rosenberg. London. John Wiley and Sons. 1975. P. 9-25.
- Boehler R. High-pressure experiments and phase diagram of lower mantle and core materials. Rev. Geophys. 2000. V. 38. N. 2. P. 221-245.
- Brans C., Dicke R.H. Mach's principle and relativistic theory of gravitation. Phys. Rev. 1961. V. 124. N. 3. P. 925-935.
- 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.
- Canuto V.M. The Earth's radius and the G-variation. Nature 1981. V. 290. P.739-744.
- 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.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversal, polar wander, and core-mantle coupling. Science 1987. V. 237. P. 1140-1147.
- 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.
- Dicke R.H. Implication for cosmology of stellar and galactic evolution rates. Rev. Mod. Phys. 1962. V. 34. N. 1. P. 110-122.

Dirac P.A.M. A new basis for cosmology. *Proc. Roy. Soc. London A.* 1938. V. 165. P. 199-206.

Egyed L. The expanding Earth. *Trans. N.Y. Acad. Sci. Ser. 11.* 1961. V.23. N. 5. P. 424-432.

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.

Flandren T.C. Determination of rate of change of  $G$ . *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1975. V. 170. N 2. P. 333.

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.

Holmes A. *Trans. geol. Soc. Glasg.* 1947. V. 21. P. 117-152.

Holmes A. *Principles of physical Geology.* Nelson. London. 1965. 1260 p.

Jephcoat A., Refson K. Core beliefs. *Nature* 2001. V. 413. P. 27-30

Jordan T.H. The deep structure of the continents. *Sci.Amer.* 1979. V. 240. N 1. P.70-82.

Kapp R.O. *Towards a unified Cosmology.* Hutchinson. London. 1960. 303 p.

Lamoreaux S.K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6  $\mu\text{m}$  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.

Longer days ahead. *Astronomy.* 1996. V. 24. N. 10. P. 28.

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  $\mu\text{m}$ . *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.

Owen H.G. Has the Earth increased in size? *New concepts in Global Tectonics.* Eds. Chatterjee S. and Hotton N. 1992. Texas Tech. University Press. Lubbock. 450 p.

Pannella G. Paleontological evidence on the Earth's rotational history since Early Precambrian, *Astrophysics and Space Science.* 1972. V. 16. P. 212-237.

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.

Sabbata V. On the variation of the gravitational constant G. *Acta cosmol. Zes.nauk UJ.* 1980. V. 570. N. 9. P. 63-90.

Scalera G. Palaeopoles on an expanding Earth: a comparison between synthetic and real data sets. *Phys. Earth Planet Inter.* 1990. V. 62. P. 126-140.

Shapiro I.I., Counselman C.C., King R. Verification of the principle of equivalence for massive bodies. *Phys. Rev. Lett.* 1976. V. 36. N. 11. 555-558.

Schmidt P.W., Embleton B.J.J. A geotectonic paradox: has the Earth expanded? *J. Geophys.* 1981. V. 49. P. 20-25.

Shukla P.K. Generation of zonal flows by drift waves in a dusty plasma. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3822-3825.

Smith P.J. Intensity of the Earth's magnetic field in the geological past. *Nature* 1967. V. 216. P. 989-900.

Sonett C.P., Kvale E.P., Zakharian A., Chan M.A., Demko T.M. Late Proterozoic and Paleozoic tides, retreat of the Moon, and rotation of the Earth. *Science* 1996. V. 273. P. 100-4.

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.

Stewart A.D. Palaeogravity in Palaeogeophysics (edit. by Rankorn, S.K) Academic Press, London. 1970.

Stewart A.D. Palaeogravity from the compaction of fine-grained sediments. *Nature* 1972. V. 235. P. 322.

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.

Tsallis C. Nonextensive statistics: theoretical, experimental and computational evidence and connections. *Brazilian Journal of Physics.* 1999. V. 29. № 1. P. 1 – 35.

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.

Xinhuanet. Algae fossil betrays time secret of 1.3 billion years ago. 2003-07-07.  
<http://www.china.org.cn/english/scitech/69268.htm>

Zahnle K., Walker J.C. A constant daylength during the Precambrian era? *Precambrian Res.* 1987. V. 37. P. 95-105.