

Лекция 4. ВНУТРЕННЕЕ УСТРОЙСТВО ЗЕМЛИ

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

Модель горячей Земли.

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

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

Выполнение этих очевидных условий должно позволить:

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

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

$$E = 3/5 GM^2/R = 2.25 \times 10^{39} \text{ эрг}, \quad (1)$$

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

В этой главе мы рассмотрим “сценарий” образования горячей Земли, включающей быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. В этом случае температура вещества Земли окажется порядка нескольких десятков тысяч градусов. Согласно этому “сценарию”, температура вещества планеты (звезды, спутника) определяется только ее массой:

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

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

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

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

Согласно нашей модели, температура $T = 30\,000$ К (или близкая к ней) присуща только веществу внутреннего ядра. Большая часть вещества Земли (внешнее ядро и мантия) за время ее эволюции уже остыла (релаксировала). Это один из главных постулатов нашей модели. Другой, не менее важный, говорит о том, что вещество, нагретое до такой температуры, будет находиться в газообразном состоянии и может быть сжато до плотности, большей, чем у металла. Отсюда следует, что начальный размер Земли, в момент ее создания, был меньше современного ($R_0 < R$). Оценки начального радиуса Земли R_0 , проведенные различными способами, не слишком надежны, хотя все они показывают, что $R_0 < R$ современного. Величина R_0 , по различным оценкам, колеблется в диапазоне 3 - 4 тыс. километров. Наиболее интересное решение нашей задачи возникает в том случае, если принять R_0 равным 3.5 тыс. км. В пользу него, приведем такое, весьма интересное наблюдение. Радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 тыс. км. Площадь поверхности внешнего ядра с удивительной точностью равна суммарной площади материков, а сами материки с удивительной точностью "совмещаются" друг с другом на шаре с радиусом, равным радиусу внешнего ядра (см. рис. 1-9, глава 1). Эти обстоятельства, по-видимому, можно истолковать в пользу того, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю её поверхность.

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

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

Эволюция параметров Земли в контексте горячей модели.

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

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

Итак, после образования, горячая Земля охлаждалась. На первом этапе остыла и кристаллизовалась ее внешняя оболочка - прообраз земной материковой, гранитной коры. Вещество протоЗемли, находящееся после образования в газообразном (плазменном)

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

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

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

В работе (Chandrasekhar, 1961) показано, что для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в ядре и мантии) произведение чисел Рейнольдса: $Re = (v_k l) / \eta$ и Прандтля $Pr = \eta / \zeta$ пропорционально корню квадратному из числа Релея:

$$Re \times Pr \sim Ra^{1/2}. \quad (4)$$

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

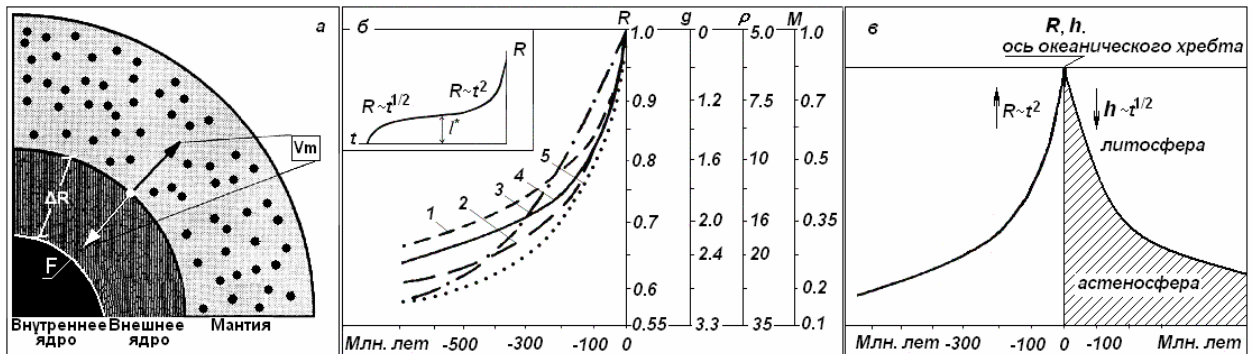


Рис. 1. (а) Перенос массы: положительной (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и “отрицательной” (внутри), - при формировании внешнего ядра, при выполнении условия соблюдения постоянства момента импульса.

(б) Изменение радиуса Земли R от времени её эволюции: - в течение всего периода эволюции t , и за 500 млн. лет. Здесь $R(t)$, $g(t)$, $\rho(t)$: 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна, 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов $M(t)$ – 5.

(в) Толщина литосферы $h \sim t^{1/2}$ в зоне СОХ.

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 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.

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

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

Планеты. Согласно нашей модели все планеты земной группы и Луна прошли такой путь эволюции. Отличие состоит только в том, что чем меньше масса планеты, тем быстрее происходит эволюция и меньше начальная плотность вещества планеты. Меркурий «выбивается» из этого ряда. Возможной причиной может быть близость его к Солнцу и дополнительный разогрев недр за счет приливного трения. Время окончания эволюции Луны определено по прекращению генерации геомагнитного поля. Период эволюции Марса и Венеры, так же «потерявших» дипольное поле, определен качественно, по пересечению линии, соединяющей Землю и Луну. Время окончания эволюции Земли оценивается делением количества метастабильного вещества G-ядра на скорость роста радиуса. Такая ориентировочная оценка показывает, что при средней скорости роста радиуса ≈ 1 см/год, его приращение $\Delta R \approx 4R_G^3 \Delta\rho/S\rho_M = (2-3) \cdot 10^6$ см, или оставшееся время эволюции $\approx 2-3$ млн. лет, т.е. фактически можно считать полное время эволюции Земли ≈ 4.5 млрд. лет. Здесь, $\Delta\rho$ - разность плотностей между G- и E ядрами, $S\rho_M$ - площадь поверхности Земли и плотность вещества верхней мантии.

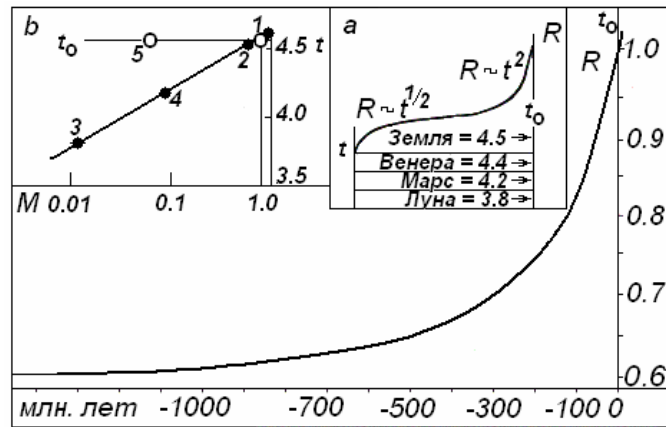


Рис. 2. Изменение радиуса планеты в период эволюции от начала до её окончания (а). Зависимость времени эволюции от массы планет и Луны (b). Здесь 1- Земля, 2 - Венера, 3 - Луна, 4 - Марс, 5 - Меркурий.

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

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

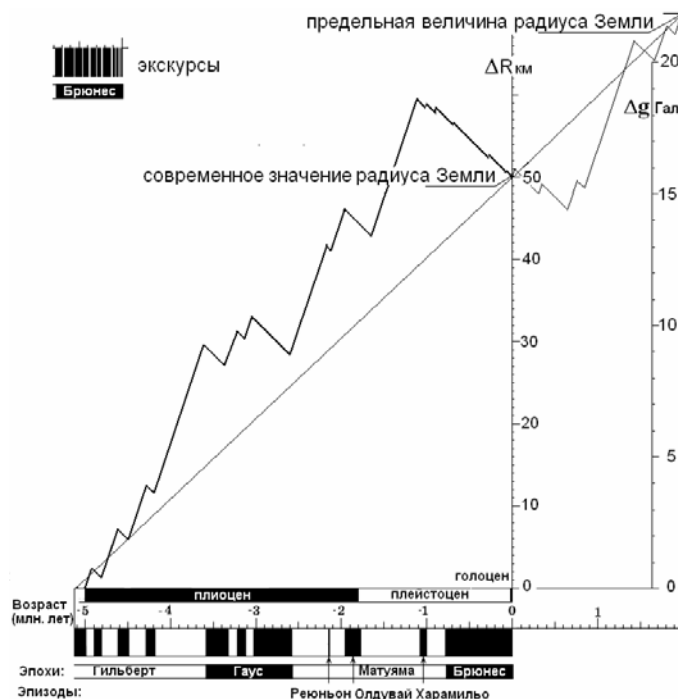


Рис. 3. Возможный (следующий из горячей модели) ход изменения радиуса Земли.

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

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

Роль водорода.

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

Совсем другое “отношение” к водороду в модели “горячей” Земли. По нашей модели, Земля образовалась вместе с Солнцем и другими планетами и их спутниками в едином процессе и из одного и того же “строительного материала”, в основном, - водорода. Вещество Земли в процессе ее образования отделилось из общей массы протосолнечного диска, было сжато и нагрето до температуры порядка нескольких тысяч градусов при самогравитации. Процесс самосжатия (коллапс) уравнивался растущей величиной внутреннего газокинетического давления. В тот момент, когда газокинетическое давление и давление самогравитации уравнились, самосжатие вещества Земли прекратилось. Земля стала остывать, формируя при этом земную кору, внешнее ядро (при конденсации первично газообразного плотного вещества, которое сохранилось до наших дней как внутреннее ядро), и мантию (при кристаллизации вещества внешнего ядра). Вещество внутреннего ядра, согласно нашей модели, представляет собой перегретый плотный газ (слабоионизированную плазму), состоящий в значительной степени из водорода.

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

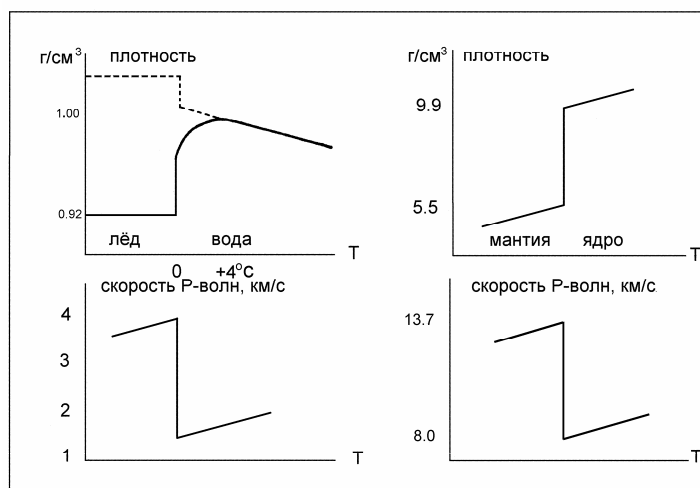


Рис. 4. Изменение плотности и скорости звука на границе лед-вода - слева; и мантия-ядро - справа.

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

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

Вода, лед и водородные связи. Вода и лед, это самое распространенное вещество во Вселенной, и в то же время, это самое необычное вещество, обладающее самыми “аномальными” (по сравнению с другими “нормальными” веществами) свойствами. Аномальные свойства воды настолько привычны, что о них обычно не задумываются. Еще Галилей заметил, что жизнь на Земле обязана проявлению водой ее аномальных свойств. Физические и химические свойства воды и льда обсуждаются в научной литературе не менее 200 лет. Аномальное поведение воды обязано, как известно, наличию у нее водородных связей. Вещества, так же обладающие водородными связями, ведут себя аналогично воде. Водородная связь это особый тип связи между атомами. Промежуточный - между валентной, и Ван дер-Ваальсовой связями. Эта связь может образоваться при наличии атома Н между двумя электроотрицательными атомами, причем с одним из них атом Н связан ковалентной связью. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния: О - О, О - N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица 4.1. (ФЭ, 1992).

Плотность льда меньше плотности воды. Это свойство отличает воду и другие вещества, обладающие водородными связями, от прочих, у которых плотность вещества в твердом кристаллическом состоянии всегда выше, чем плотность его расплава. При переходе жидкости в твердое состояние, молекулы большинства веществ в обычном

состоянии располагаются теснее, а само вещество становится плотнее. Однако, это совсем не так у воды. Охлаждая воду, можно наблюдать за поведением ее плотности (см. рис. 4). В начале плотность ведет себя обычным образом: вода при охлаждении становится все плотнее и плотнее. После охлаждения ее до температуры 4 °С она, вопреки общим представлениям, становится легче, а замерзая и образуя лед, еще легче.

Таблица 1.

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

Из таблицы 1 следует, что наличие (сильной) водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

Вода представляет собой гидрид кислорода. Сравним ее свойства со свойствами гидридов элементов, входящих так же как кислород в шестую группу таблицы Менделеева. Данные по температурам плавления и кипения этих гидридов приведены в таблице 2. В четвертой строке таблицы указаны примерные величины температур плавления и кипения воды, если бы она была обычным гидридом, и не обладала бы водородными связями. Оценка получена в предположении об обратной зависимости температур плавления и кипения от величины молекулярного веса. Эта зависимость достаточно четко прослеживается для гидридов первых трех столбцов таблицы. Из таблиц 1 и 2 видно, насколько наличие водородных связей меняет не только плотность упаковки вещества, но и его термодинамические характеристики: Наличие водородных связей в веществе, в нашем случае в воде, приводит к повышению его температуры плавления примерно на 95, а температуры кипения, на 170 градусов. Если бы вода не обладала способностью к образованию водородных связей, то в нормальных условиях она находилась бы только в газообразном состоянии и превращалась в жидкость при температуре порядка -70 °С.

Таблица 2.

	Гидриды:	Т плав. (°С)	Т кип. (°С)	Молек. вес:
1	H ₂ Te	- 60	- 5	129.6
2	H ₂ Se	- 65	- 40	81
3	H ₂ S	- 85	- 60	34
4	H ₂ O	- 95	- 70	18
5	H ₂ O	0	100	18

Природа аномального поведения воды была предметом исследований более 200 лет тому назад Генри Кавендиша и Антуана Лавуазье. Они заложили основы современного понимания природы воды. В 1910 г. физики, американец П. Бриджмен и немец Г. Тамман, обнаружили, что лед может образовывать несколько полиморфных кристаллических модификаций. Понятие о водородных связях было впервые введено в 1920 г. американскими учеными У. Латимером и У. Родебушем. С этих пор водородные связи являются предметом фундаментальных исследований. Английский ученый Уильям Брэгг, разработавший рентгеноструктурный метод анализа кристаллов, обнаружил, что каждая молекула H₂O во льду окружена четырьмя другими молекулами. В 1932 году ученик Брэгга проф. Д. Бернал совместно с Р. Фаулером (Бернал, Фаулер, 1934) разработали теорию молекулярной структуры воды, основанную на интерпретации

рентгенографических данных льда. В основе их теории были положены представления о воде как о трехмерной структуре с четверной координацией.

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

Стоит упомянуть идеи Л. Полинга, высказавшего в 1952 году предположение, что структура воды подобна структуре клатратных гидратов. Полинг предполагал, что у льда и воды, находящейся при различной температуре, количество водородных связей весьма различается. По его данным при 0° С около 15 % водородных связей оказываются разорванными. По характеру зависимости диэлектрических свойств воды от температуры, удалось выяснить, что при 25° С в жидкой воде 67 % всех молекул H_2O сохраняют все четыре водородные связи, 23 % - три водородные связи, 7,6 % - две связи и лишь 0,2 % полностью свободные молекулы. Английский физик Д.Ж. Попл предположил, что водородные связи вообще не рвутся, а всего лишь “изгибаются”. Перестройка структуры воды, по Поплу, происходит именно благодаря “изгибанию” водородных связей. Холл предложил рассматривать воду как ассоциат, состоящий из двух структур: обычной и плотноупакованной. Упомянем еще одно, весьма важное свойство водородных связей. Оно называется кооперативностью и означает, что образование одной водородной связи способствует возникновению рядом следующих связей. Идея кооперативности основывается на том, что для образования системы водородных связей требуется меньше энергии, чем арифметическое сложение энергий отдельных связей.

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

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

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

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

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

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

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

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

Водородные связи являются причиной и другого уникального свойства воды - при плавлении ее плотность возрастает. В структуре льда каждый атом кислорода связан через атомы водорода с четырьмя другими атомами кислорода - из других молекул воды. В результате образуется очень рыхлая "ажурная" структура. Вот почему лед такой легкий. *При плавлении льда около 10% водородных связей разрушается*, и молекулы воды немного сближаются. Поэтому плотность жидкой воды при температуре плавления выше, чем плотность льда. Дальнейшее нагревание, с одной стороны, должно вызывать увеличение объема воды. Это происходит со всеми веществами.

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

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

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

Температура, давление и плотность вещества в центре Земли.

Задача определения термодинамических параметров горячей Земли не допускает широкого разнообразия вариантов. Полагая, что масса Земли в процессе ее эволюции практически не меняется, температура определяется достаточно строго, а внутреннее давление является функцией радиуса Земли и температуры ее вещества, остальные параметры оцениваются более или менее однозначно. Согласно нашей модели, как отмечалось, начальный радиус Земли был примерно в два раза меньше современного. Следовательно, Земля расширялась, и ее объем в течение эволюции увеличился примерно в 8 раз. Начальная величина плотности вещества Земли составляла примерно 35 г/см^3 , что в три раза больше современной величины плотности вещества внутреннего ядра ρ_G .

Давление. Величина современного давления в центре Земли оценивается как $p = \rho g R$ $= 3.5 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$. Давление в центре Земли в момент ее образования (по нашей модели) $p_0 = \rho_0 g_0 R_0$ должно было быть примерно в 10-15 раз выше, чем современное. Воспользуемся

оценкой Ландау (Ландау, Лифшиц; 1964) для величины давления вещества, находящегося в сверхсжатом состоянии, $p \sim \rho^{5/3}$ (примерно: $p \sim \rho^2$). Отсюда следует, что величина плотности внутреннего ядра должна уменьшаться в течение эволюции Земли, по мере уменьшения давления, и достигнуть к настоящему времени общепринятых для величины плотности вещества внутреннего ядра значений. Так как начальный радиус Земли оказался примерно вдвое меньше современного, то гравитационная энергия только что образованной Земли должна быть примерно вдвое больше (а величина $g_o \approx 3.5 g$), 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 .

Температура. Тем не менее, если принять $T_o \approx 2T$ и учесть зависимость ρ от p ($p \sim \rho^2$), то можно оценить величину μ_o . Так как $T/\mu \sim p/\rho \sim (p)^{1/2}$, то $T_o/\mu_o \approx 1$, а величина $\mu_o \approx 5$, 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 μ уменьшилась вдвое. Будем полагать, что μ^* современной Земли: $\mu^* \approx 50$ (не путать с μ внутреннего ядра). Массу Земли можно представить: $M = Nm\mu^*$, где N - полное число атомов (молекул). Массу потерянного Землей водорода, аналогично: $M_H = 10Nm\mu_H$, где $\mu_H = 1$ - атомный вес водорода, а 10 - число атомов водорода на один атом железа. Отсюда: $M_H/M \approx 1/5$, или, иначе, потери водорода составляют не более 20% от начальной массы Земли M_o , что, при наших точностях оценок, не должно особенно сказаться.

Тепловой поток. Градиенты температуры и давления dT/dR и dp/dR , согласно нашей модели, были, в прошлом, заметно выше (первый примерно в 3-4 раза выше, а второй - в 15-20 раз). Следовательно, тепловой поток Q ($Q \sim dT/dR$) на начальном этапе эволюции Земли тоже был выше современного. Кстати, по нашей модели, можно оценить величину теплового потока. Воспользуемся для этого известной термодинамической формулой, связывающей энергию и энтропию системы: $dE = T dS - p dV$. Положим, что температура T изменяется в области фазового перехода на 10 000 К, а изменение энтропии dS порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина $T \cdot dS \approx U$, где U - теплота фазового перехода - конденсации, $U = (10-15)$ кДж/г. Величина теплового потока в этом случае:

$$Q = T \cdot dS \cdot M/t_o, \quad (5)$$

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

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

Водород. Как показано выше, наличие водорода и образуемых им водородных связей в ядре Земли - играет огромную роль в формировании внешнего ядра и мантии. Сравним энергетический вклад водорода в геодинамические процессы в мантии с тепловым потоком. Очевидно, что это весьма ориентировочная оценка, но она говорит о несомненном участии водорода в эволюции Земли. Итак, потери водорода составляют примерно 1/5 от массы Земли. Примем массу водорода $M_H \approx 10^{27}$ г. Энергию водородной связи примем равной 1 ккал/моль или 4кДж/г. Предположим, что все атомы водорода

включены в водородные связи. Тогда общая энергия связей будет равна $4 \cdot 10^{27}$ кДж или $4 \cdot 10^{37}$ эрг, что составляет 2 % от полной гравитационной энергии Земли. Разделив эту величину на время эволюции Земли, получаем цифру (10^{28} эрг/год), сравнимую с величиной оцененного нами выше - теплового потока.

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

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

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.

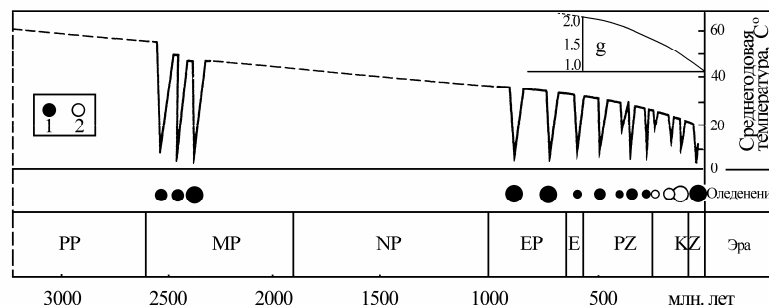


Рис. 5. Температура поверхности Земли. В правом верхнем углу зависимость: $g(t)$.

Хорошо известно, что Земля “пережила” несколько оледенений. Следуя В.Н.Саксу (1947), “... нужно отказаться от мысли, что оледенения были чем-то случайным в истории Земли. Особенно обращает на себя внимание то обстоятельство, что крупные оледенения всякий раз следовали за интенсивным проявлением складкообразовательных процессов. Так, четвертичные ледники появились после альпийской складчатости, верхнепалеозойские - после герцинской, протерозойские - после докембрийской. Напротив, эпохи обширных трансгрессий моря, предшествовавшие основным фазам складчатости, характеризовались относительным выравниванием климатов на земной поверхности ...” (с.29-30). Это один из примеров связи pT (давление-температура) параметров на поверхности Земли с внутриземными орогенными процессами. Надо сказать, что в наше время эти взгляды не разделяются большинством специалистов. Так, например, Чумаков (1995) полагает, что климатические изменения имеют ритмический характер, а «главные различия между ледниковыми и безледниковыми интервалами

геологической истории заключались в увеличении амплитуд климатических колебаний. Это было связано, по-видимому, с совпадением холодных фаз сверхдлинных, длинных и коротких климатических колебаний, приводивших к возникновению криосферы и увеличению альбедо во время климатических минимумов» (с. 37). Бытующее среди многих геологов мнение, относительно того, что эволюция Земли состоит из сочетания суммы разнофазных колебательных процессов, не согласуется с обсуждаемой на страницах этой книги моделью Земли, как открытой, самоорганизующейся диссипативной системы. Изменение климата и его связь с геомагнитным полем рассмотрено в следующих лекциях.

Наиболее важная характеристика климатического процесса – это температура и ход её изменения в развитие этого процесса. Поэтому, несомненный интерес представляет зависимость температуры поверхности Земли от времени её эволюции. Несмотря на то, что многие геологи, так же как Дж. Ферхуген и др. (1974) считают, что “... мы еще очень далеки от действительного понимания термальной истории Земли” (с. 739), такая зависимость для Земли известна. Она построена многими авторами по изотопным соотношениям (кислорода O^{16}/O^{18} и водорода/дейтерия) и восстановленному палеотемпературному градиенту. Среди авторов (см. например, Шульдинер, 1985) имеются небольшие расхождения в величинах температур для одних и тех же периодов эволюции Земли, но общий характер остается примерно одинаковым (см. рис.). По видимому, есть основания считать, что температура на поверхности Земли примерно 3.8 млрд. лет назад приближалась к $100^{\circ}C$ (Океаны кипели! Если не учитывать тот факт, что плотность атмосферы была выше современной). Можно восстановить (Кузнецов, 1990) эту зависимость для ранней Земли, ко времени 4.5 млрд. лет назад. Температура окажется порядка $300^{\circ}C$ (и более). Это, однако, не самая высокая оценка температуры поверхности ранней Земли, например, согласно Р. Геррелсу и Ф. Маккензи (там же, с. 79): “... температура на поверхности ранней Земли достигала $600^{\circ}C$, а давление превышало 360 атмосфер, из которых на долю воды приходилось 300, углекислоты - 45, соляной кислоты 10 атм”. Различные авторы попутно неоднократно высказывали идею, согласно которой древняя атмосфера Земли соответствует атмосфере современной Венеры.

Таблица 3.

Период	Возраст, млрд. лет	Температура поверх. $^{\circ}C$	Атмосферное давление, атм.	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 4.3. Из этой таблицы, как и из рисунка 6, следует, что температура поверхности Земли и её атмосферное давление плавно понижались в течение всего периода эволюции. Менялся химический состав атмосферы: исчез водород, уменьшилась концентрация воды, выросла концентрация кислорода и т.п.

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

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

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

$$K = \int q dV = \int S_o d\Sigma, \quad (6)$$

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

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

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

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

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

$$1/l \approx 5 \times 10^{-7} p^{1.3}, \quad (8)$$

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

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

$$E = c_V M T_0,$$

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

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

$$\Delta E \approx (l/x) \times \sigma T^4 s t, \quad (9)$$

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

$$E_1 = c_V M T_1 = c_V M T_0 - (l/x) \times \sigma T_0^4 s t, \quad (10)$$

или:

$$T_1 = T_0 [1 - ((l/x) \times \sigma T_0^3 s t) / c_V M]. \quad (11)$$

Таким образом, получаем формулу вида:

$$T_1 = T_0(1 - \alpha T_0^3), \quad (12)$$

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

$$T_2 = T_1(1 - \alpha T_1^3) \text{ и т.д.} \quad (13)$$

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

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

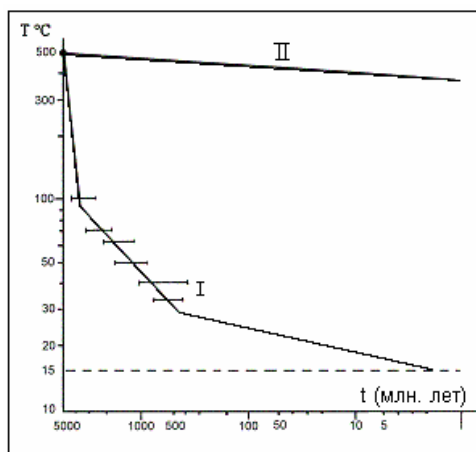


Рис. 6. Температура Земли (I) и Венеры (II) в течение времени эволюции.

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

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

Здесь уместно отвлечься и сказать несколько слов о причине оледенений, и их связи с внутренними, эндогенными процессами, о которых писал Сакс. Период (этап) расширения Земли (согласно нашей модели) связан с резкой интенсификацией её вулканической и горообразовательной деятельности. В такой период времени, в

атмосферу Земли выбрасывается огромное количество пепла, который, надолго оставаясь в атмосфере, экранирует от Земли солнечное тепло. Если при этом температура поверхности Земли определялась солнечным теплом (как сейчас), а не внутриземным тепловым потоком (который в настоящее время намного меньше, чем поток тепла от Солнца), то её охлаждение поверхности в периоды экранировки и оледенения очевидно. Если в истории Земли происходили оледенения в рассматриваемый нами период (от 0.5 до 3.5 млрд. лет назад), то наша модель охлаждения была бы верна при одном условии: уровень инсоляции в те далекие времена был значительно выше современного, или иначе, Солнце было значительно “горячее”, чем сейчас.

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

Как ответить на вопрос: соответствует ли современная “обстановка” на Венере обстановке на поверхности молодой Земли? Предположим, что Венера была изначально нагрета сильнее, чем Земля. Допустим, что относительный перегрев составлял, например, 100° С. Допустим так же, что толщина атмосферы Венеры изначально была больше земной примерно в два раза, а начальное давление, в три раза выше. Всё это может привести к тому, что величина коэффициента α атмосферы Венеры окажется меньше чем у Земли примерно на порядок. Для оценок, примем для начальной атмосферы Венеры: $\alpha = 3 \cdot 10^{-11} \text{ К}^{-3}$. При этом характер изменения температуры поверхности меняется существенным образом (см. рис. 4-7). Вполне возможно, что незначительные изменения начальных условий на поверхности Венеры, относительно условий на Земле, привели к тому, что Венера остывала (и продолжает остывать) более медленно, чем Земля.

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

Обратимся к фактам, объяснение которых породило плитную тектонику. Как мы уже отмечали, все началось с изучения дна океанов. (Заметим, что океаны составляют 2/3 поверхности Земли и в значительной степени определяют “лик” нашей планеты). Факты и гипотезы об океанах наиболее обстоятельно и убедительно изложены в книге Е.М. Рудича

(1984), который показывает, что объем мирового океана значительно увеличился в течение последних 160 млн. лет (рис. 1-10). Эти данные получены на основании анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин пробуренных при выполнении почти 70 рейсов судна “Гломар Челленджер”) акватории Мирового океана; исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением, и анализа глубины и условий накопления океанических осадков.

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

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

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

Можно ли доверять таким данным, которые показывают резкое увеличение объема океанов, начавшееся 160 млн. лет назад? Выяснению этого вопроса посвящена статья Стейнера (Steiner, 1977), в которой автор приводит данные по скорости увеличения площади поверхности океанов: Тихого, Атлантического и Индийского. Данные получены на основании изучения полосовых магнитных аномалий. Площадь Тихого океана начала резко увеличиваться 165 млн. лет назад (см. рис. 1-10), одновременно, но с меньшей интенсивностью, стала возрастать площадь северной части Атлантического океана. Чуть позже, 135 млн. лет назад в процесс роста океанов “включился” Индийский океан и южная часть Атлантики. Суммарная скорость роста площади трех океанов составляет, по верхней оценке Стейнера, примерно 3000 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 см/год, для Индийского океана - 7.6 см/год и для Атлантического - 4.3 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 1-10 (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. 1-9). Это верно, по крайней мере, в течение последних 160 млн. лет. Иначе, периметр Тихого океана в течение этого промежутка времени никогда не был больше современного. Об этом свидетельствует и рис. 1-10, где показано, что Австралия и Антарктида “расстались” всего 50 млн. лет назад, Южная Америка - с Антарктидой “совсем недавно”, а Южная и Северная Америки и Азия, - так и “не расставались”. Если сохранять условие постоянства (или очень небольшого увеличения) периметра Тихого океана, то каким же образом, спрашивает Мезервей, можно соединить Африку с Южной Америкой, которые разъединились друг с другом примерно 135 млн. лет назад? Ответа нет на этот, надо сказать, очень простой вопрос. Его нет, и не может быть, - в рамках плитной тектоники в том упрощенном виде, как её преподают в школах и университетах.

Несмотря на, казалось бы, убедительные факты, далеко не все геологи разделяют точку зрения, согласно которой океаны в основном сформировались на Земле лишь в “последние” 160 млн. лет. Тем не менее, никто из них не отрицает факта бурного роста океанической коры и увеличение объема воды Мирового океана именно в этот период эволюции Земли. Здесь многих привлекает период, о котором мы уже говорили, продолжавшийся с 120 млн. назад до 80 млн. лет. В течение этого периода не было инверсий, это так называемый период спокойного магнитного поля, или, его называют ещё, - меловой суперхрон. Принято считать, что в этот период Земля изменила характер эволюции и вместо спрединга океанической коры, наращиваемой посредством “работы” СОХ, она увеличивала объем путем генерации плюмов (Larson, 1991; Fuller, Weeks, 1992). Авторы этих и большого количества подобных публикаций, сопоставляют период спокойного магнитного поля с периодом интенсификации образования плюмов. Некоторые авторы (Larson, 1991), показывают в своих работах, что характер эволюции Земли в эти периоды (суперхроны - суперплюмы) резко отличался как от периодов предыдущих, так и последующих. В частности считается, что именно в эти периоды на

Земле были образованы основные запасы нефти и других углеводородных полезных ископаемых. Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон и другие, более ранние периоды. (Обратим внимание на то, что отмечаемые нами здесь корреляции не находят объяснения в рамках модели холодной Земли).

Не менее удивительны и другие синхронные проявления активности Мирового океана, атмосферы и климата: эти корреляции известны геологам как трансгрессии и регрессии. Например, Мёрнер (1986) исследовал несколько катастрофических событий, одно из которых произошло на Земле на рубеже эоцена и олигоцена (рис.7), когда наблюдалось крупное похолодание, падение уровня моря и уменьшение разнообразия форм фауны. Ряд подобных катастрофических событий случились на Земле сравнительно “недавно”, в период времени, называемый палеомагнитологами эпохой Брюнеса.

Выделяются несколько событий, причем последнее из них - Гетеборг (Палеомагнитология, 1982; Мёрнер, 1986). Это событие происходило от 20 до 12 тыс. лет тому назад. Событие Гетеборг выделено в истории геомагнитного поля как экскурс. Это событие, как и ряд подобных (рис. 8), предшествующих, характеризуется рядом признаков:

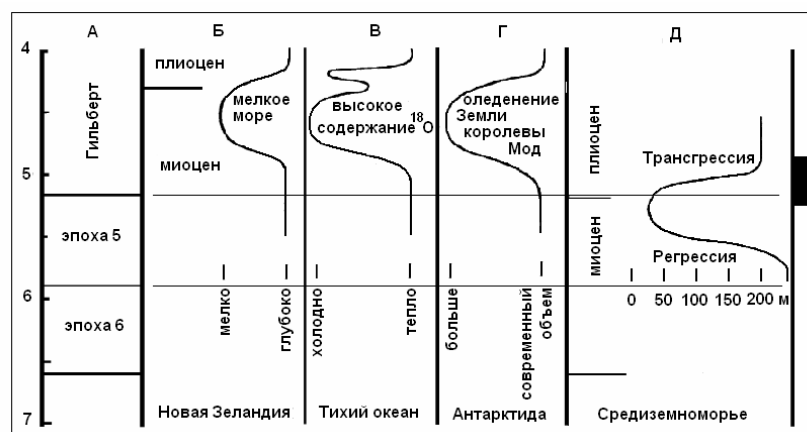


Рис. 7. Событие на границе миоцена и плиоцена (Мёрнер, 1986).

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

- оледенением Антарктиды;
- регрессией и трансгрессией в Новой Зеландии.

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

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

Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции и, например, в частности, в чем состоял механизм образования нефти и газа. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон произошедший в период 250 - 165 млн. лет, который так же как меловой имел современную полярность геомагнитного поля. Поле каменноугольного суперхрона (320 – 250), предыдущего юрскому суперхрону, – имело отрицательную полярность (Харленд, 1985). Периоды суперплюмов перемежались частыми инверсиями геомагнитного поля.

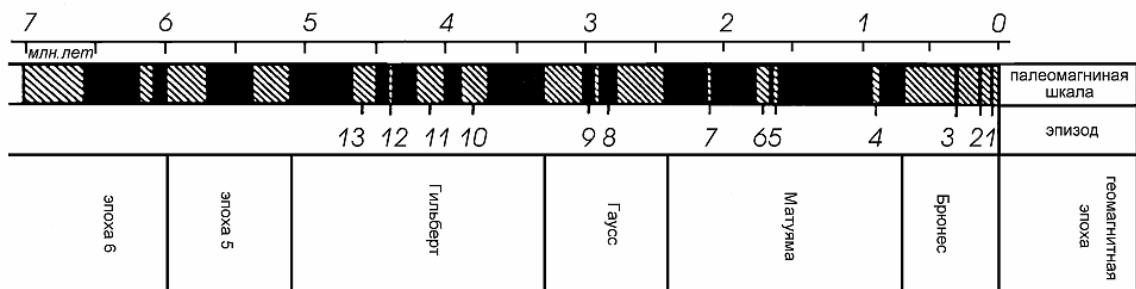


Рис. 8. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн. лет.

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