

Костюкова Нина Ивановна, Михайленко Борис Григорьевич

АСПЕКТЫ ТЕКТониКИ

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2012/1/10.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2012. № 1 (56). С. 37-41. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2012/1/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

Список литературы

1. Душин С. Е. и др. Теория автоматического управления / под ред. В. Б. Яковлева. М.: Высшая школа, 2003. 567 с.
2. Ильюшин Ю. В. Стабилизация температурного поля туннельных печей конвейерного типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. «Информатика. Телекоммуникации. Управление». 2011. № 3 (126). С. 67-72.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.

УДК 519.6

Нина Ивановна Костюкова, Борис Григорьевич Михайленко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

АСПЕКТЫ ТЕКТониКИ[©]

Схема протекания процессов на границе внутреннего и внешнего ядра, взятая за основу в нашей модели, объясняет периодическое появление давления, направленного против *сил гравитационного сжатия* планеты: когда оно больше этих сил, происходит расширение *Земли*, когда меньше - сжатие.

Период *расширения Земли* - это период проявления ее *тектонической активности*. Именно в течение этого времени происходит разрастание океанического дна, раздвижение континентов, образование поднятий и гор. В течение этого периода, по нашей модели, *МПЗ* имеет полярность, обратную современной. Сжатие *Земли*, следующее за расширением, приводит к появлению *геосинклиналей*, образованию складок, надвигов и тому подобное. Полярность *МПЗ* - современная.

Замечено, если *МПЗ* той или иной полярности стабильно и не меняется в течение длительного периода (несколько миллионов лет), то стабильны и *тектонические* процессы на *Земле*. Если же *МПЗ* меняется сравнительно часто, то именно тогда на *Земле* происходят процессы, связанные с максимальной *тектоническо-магматической активностью* [1].

Обозначим время *прямой полярности МПЗ* - t_1 , *обратной* - t_2 , тогда: если t_1, t_2 велики ($>10^6$ лет), то *Земля* развивается относительно спокойно, если t_1 и t_2 малы ($<10^6$ лет) - на *Земле* наступают *тектонически активные* периоды, причем чем меньше t_1 и t_2 , тем активнее *Земля*.

В этой связи, прежде чем рассматривать особенности *тектоники* в модели *расширяющейся Земли*, необходимо оценить, как будет выглядеть этот экспериментальный факт в рамках нашей модели.

Пульсирующий характер расширения Земли

Процесс конденсации вещества приводит к выделению тепла на холодной стенке. Она нагревается, что ведет к уменьшению интенсивности конденсации или к ее прекращению. Стенка за счет теплопроводности материала остывает, вновь создавая условия для начала конденсации. Таким образом, возможен *пульсирующий характер конденсации* или, применительно к нашей модели, *пульсирующий характер расширения Земли*.

Аналогично тому, как в электротехнике характерное время процесса *релаксации схемы* определяется произведением электрического сопротивления на емкость, в нашем случае время процесса охлаждения «стенки» за счет *теплоотвода* t_1 будет определяться отношением *теплоемкости* вещества C_p к его *теплопроводности* λ : $t_1 = \frac{C_p * \rho * \delta^2}{\lambda}$, где ρ - изменение плотности вещества в *F-слое* относительно *G-ядра*

($\rho \approx 10 \text{ г/см}^3$), δ - характерный размер толщины «стенки» (эта формула получена при решении *уравнения теплопроводности Фурье*).

Заметим, что никакой «стенки» в нашей модели нет и быть не может, эта аналогия приведена лишь затем, чтобы показать, что процесс *конденсации* вещества *G-ядра* может происходить с *флуктуацией* его интенсивности во времени. Поэтому «стенка» - не более чем некоторый характерный размер - толщина слоя, в объеме которого реализуется фазовый переход - *конденсация*. Поскольку толщина *F-слоя* (ΔR) равна приблизительно 100 км, то величина δ должна быть меньше ΔR , но примерно того же порядка (примем $\delta \approx 10 \text{ км} = 10^6 \text{ см}$).

Определим величину t_1 . По *палеомагнитным данным* для современной *магнитной эпохи Брюнеса*, характеризуемой в целом *прямой* (современной) *полярностью МПЗ*, это время порядка 100 тысяч лет ($\approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}$). В нашей модели это и есть период, в течение которого *Земля* не расширяется (охлаждается «стенка»), то есть величина примерно того же порядка.

Оценим, далее, величину $\frac{C_p}{\lambda} = \frac{t_1}{\rho \delta^2} = 0,3 \left(\frac{CM * C}{G} \right)$. Известно (из справочных данных), что для большинства **конденсированных тел** величина $\frac{C_p}{\lambda}$ (в приведенной размерности) изменяется в пределах от 0,03 (**металлы**) до 30 (**диэлектрики**). Таким образом, полученная нами оценка величины $\frac{C_p}{\lambda}$ укладывается в интервал «**разумных**» значений этого отношения.

Время t_2 определяется скоростью процесса **конденсации** вещества **G-ядра** - K . В принципе $t_2 \approx \frac{1}{K}$. Массовая скорость **конденсации** $V_k = K \rho_2 V$, где ρ_2 - **плотность вещества G-ядра**, V - **объем вещества**, перешедшего в **конденсированное** состояние за время t_2 : $V = 4\pi R_G^2 x$, R_G - **радиус G-ядра**, x - изменение R_G за время t_2 : $x = V_r t_2$; V_r - как и раньше, скорость расширения.

Но скорость U_K можно оценить и по величине **теплового потока** Q , считая приближенно, что вся энергия, выделяемая при **конденсации**, преобразуется в тепло и без потерь доходит до поверхности Земли: $V_k = \frac{Q}{U}$, где U - **теплота фазового перехода**.

Скорость конденсации $K = \frac{Q}{4\pi U \rho_2 R_G^2 V_r t_2}$ и для значений: $U = 10$ кДж/г, $\rho_2 = 35$ г/см³, $R_G = 1,2 * 10^8$ см, V_r до 10 см/год, t_2 - около 10^4 лет, оказывается порядка $(10^{-13} - 10^{-14}) \frac{1}{c}$.

Для оценки скорости **конденсации** K воспользуемся формулой **Я. И. Френкеля** [4], преобразованной после подстановки таких физических величин, как **поверхностное натяжение, критический радиус зародыша, разность потенциалов**. Поскольку химический состав вещества **G-ядра** неизвестен (по всей видимости, его состав не должен значительно отличаться от состава вещества **коры и мантии Земли**), в формулу подставлены термодинамические и физические величины металла (в частности, меди). После преобразования формула Френкеля обретает вид: $K \approx 10^{26} \exp(-3/\ln^2 S + \ln S)$, где S - степень пересыщения, то есть отношение давления пара вещества при заданной температуре к давлению насыщенного пара при той же температуре. Для малых S (как в нашем случае) величина $K \approx 10^{26} \exp(-3/\ln^2 S)$.

Величине $K \approx 10^{-13} I/c$ соответствует значение $SW = 1,2$. Заметим, что изменение величины S примерно на 1% ($S = 1,21$) приводит к увеличению (уменьшению) скорости конденсации K более чем на три порядка. Отсюда следует, что весьма незначительные изменения условий (температуры и давления) в зоне конденсации влекут за собой существенные изменения ее скорости.

Анализируя зависимость произведения $K * V_r$ от времени цикла $t_2 (KV_r \approx \frac{1}{t_2})$, приходим к выводу: увеличение KV_r эквивалентно уменьшению i_2 . Увеличение величины $K * V_r$ согласно нашей модели характеризует возрастание **тектонической активности Земли**. В свою очередь, уменьшение времени цикла t_2 эквивалентно увеличению частоты **инверсий МПЗ**. Таким образом, предлагаемая модель дает объяснение известному экспериментальному факту.

Параметр $K * V_r$ имеет физический смысл как производная по времени скорости расширения Земли: чем выше производная, тем интенсивнее **тектонические** процессы. Кроме того, когда $K * V_r > 0$ - **Земля** расширяется, $K * V_r \approx 0$ - относительно стабильное ее состояние, $K * V_r < 0$ - сжатие.

Толщина литосферы

Литосфера (упрощенно, по нашей модели) - оболочка **Земли**, в которой происходят **тектонические** процессы, такие как **разломы, колебания, образование гор и поднятий** и тому подобное. Ниже этой оболочки **Земля** ведет себя как **пластическое тело**, выше, то есть в области **литосферы** - как **упруго-пластическое**.

В течение периода t_2 , когда происходит расширение **Земли**, в области границы **G-ядра** возникает давление $P_F \approx \frac{\Delta \rho}{m} kT$, направленное вдоль по радиусу **Земли** от границы **G-ядра** к поверхности **Земли** ($\Delta \rho$ - разность в плотностях между **G** и **E слоями ядра**), m - масса атома (молекулы) вещества **ядра** (для $S_i Q_2 m = 10^{-22}$ г), k - **постоянная Больцмана**, T - температура (в **F-слое** $T \neq 10^4 K$). По оценкам, $P_F \approx 10^6$ атм., оно убывает с уменьшением глубины h : $P_h \approx \frac{P_F * R_F^2}{(R_3 - h)^2}$ (для $h \leq R_3 - R_G$).

Давление в центре *Земли* $P_0 = 3,7 \cdot 10^6$ атм., распределение давления по радиусу $P_r \approx \frac{h}{R_3} \cdot P_0$, направление давления обратно направлению P_h . По определению, $P_r < P_0$, поэтому на значительной части радиуса *Земли*: $P_h < P_r$ за исключением внешней оболочки глубиной h . В этой оболочке давление, вызванное процессами расширения *Земли*, может превысить **литостатическое давление**. При этом условии в оболочке толщиной h могут возникнуть названные выше **тектонические** процессы. По окончании периода t_2 , то есть процесса расширения, начинается процесс сжатия оболочки h , так как в период t_1 **литостатическое** давление превышает давление расширения.

Оценим величину h , для чего приравняем: $P_h = p_r$. Отсюда $h = \frac{P_r \cdot R_F^2}{P_0 \cdot R_3} \approx 60$ км (для $h \ll R_3$), что неплохо согласуется со средним значением толщины (мощности) **литосферы Земли**.

Образование астеносферы

Известно, что толщина **литосферы** h под **срединно-океаническими хребтами** не постоянна, а увеличивается по мере удаления от **рифтовых зон**. Общий характер этой зависимости $h \approx \sqrt{t}$, где t - расстояние от **рифтовой зоны** до точки измерения, выраженное в миллион лет, толщина h - в км. К настоящему времени, насколько нам известно, нет однозначного объяснения замеченной зависимости. Поэтому попытаемся дать интерпретацию этой зависимости в нашей модели.

Возникающее под действием сил расширения давление может привести к «разрыву» внешней оболочки *Земли*, в результате образуется **трещинная (или рифтовая) зона**. В окрестности влияния **рифта** возможно «течение» **мантийного вещества Земли**. Этот процесс, при диссипации энергии давления расширения *Земли*, приведет к расплавлению энергии давления расширения *Земли*, приведет к расплавлению вещества (переходу его в пластическое состояние), то есть к образованию магмы. Если расширение *Земли* происходит длительное время, то в «течение» вещества вовлекается все большая его часть. В результате возможно образование «воронки» из расплавленного подвижного вещества (астеносферы), находящегося внутри неподвижного (литосферы). Узкая часть (горловина) этой воронки будет совмещаться с местоположением рифта.

Такое протекание процесса образования расплавленного подвижного мантийного вещества (остывшего затем в течение периода t_1 и называемого **астеносферой**) аналогично хорошо известной в гидродинамике задаче об образовании воронки ртути, расположенной над водой [3].

Ртуть, налитая на поверхность воды, неустойчива. На ее поверхности образуется небольшой бугорок, вокруг которого развивается неустойчивость. Через эту неустойчивость происходит течение (сток) вещества, по форме напоминающее воронку. Это явление экспериментально реализуется следующим образом. В сосуд наливают ртуть, сверху воду. Затем сосуд резко (с ускорением в несколько g , где g - **ускорение силы тяжести**) подбрасывается, при этом наблюдается образование воронки ртути в воде.

Поле скоростей движения частиц ртути: $V = V_0 e^{-r/\chi}$, где V - распределение скоростей по радиусу r от оси неустойчивости (от места образования бугорка), V_0 - скорость в точке, где $r = 0$, χ - толщина слоя ртути.

Используя это решение [Там же], толщину **литосферы** можно определить аналогичным образом: $h = h_0 (1 - e^{-t/T_0})$, где h_0 - масштаб процесса, имеющий размерность длины, t - расстояние в точке измерения до рифта, измеряемое в миллионы лет, T_0 - толщина **астеносферы** (миллионы лет).

Зависимость $h = 100(1 - e^{-t/50})$ неплохо соответствует экспериментальным данным. Эта кривая заключена между $h = 7,5\sqrt{t}$, приведенной **Т. Иоши**, и $h = 9,4\sqrt{t}$, полученной **Р. Л. Паркером и Д. В. Ольденбургом** [2]. При толщине астеносферы порядка 100 км и $T_0 \approx 50$ млн. лет получаем величину радиальной скорости подъема вещества **астеносферы** 0,2 см/год. Напомним, что средняя скорость расширения *Земли* за последние 50 лет равна примерно 0,4 см/год, то есть составляет величину того же порядка.

Отметим, что такая модель образования **астеносферы** дает лишь общую картину. В реальности необходимо учитывать процессы **диссипации энергии**, переход вещества в **пластическое состояние** (плавление - в нашей терминологии). Однако качественно картина образования **астеносферы**, по-видимому, отражена верно. **Астеносфера** (в нашей модели) должна образовываться в тех местах **планеты**, в которых сосредоточены основные механические напряжения: это - **рифтовые зоны, океанические подвижные пояса, зоны границы между океанической корой и континентальной** и тому подобное.

Действительно, **астеносфера**, представляющая собой вещество, характеризующееся сравнительно низкими скоростями сейсмических волн, **мелкомасштабной скоростной неоднородностью, повышенной электропроводимостью и пластичностью, обнаруживается в тектонически активных районах; на континентах пределах платформ и под древними океаническими плитами преобладают области отсутствия** или слабого развития **астеносферных зон**.

Образование астеносферы - следствие действия механизмов расширения (разуплотнения вещества на границе *G-ядра, кристаллизации* его на границе *ядро - мантия, генерации вещества мантии* и прочее). Можно сделать вывод, что в окраинно-океанических зонах вместо принятой в гипотезе *тектоники* плит «субдукции» - подвигания плит океанической коры под континенты, лучше объясняет известные факты «*эдукция*», то есть вынос материала из-под континента в сторону океана.

Ранее нами предполагалось, что величина силы внутреннего давления, обязанного расширению *Земли*, достаточна для раздвижения материков и образования океанической *астеносферы*. Представим себе, что эта сила в другом районе *Земли* будет значительно меньше. При наличии трещины в коре возможно «*течение*» существенно меньших масштабов, реализуемое на *Земле*, например, в виде вулкана.

Возможен случай, когда в коре трещины нет, и она представляет собой прочную преграду, под которой за счет внутренних локальных свободных полостей происходило «*течение*» с образованием локальной *астеносферной* зоны. Сброс накопившейся энергии в такой ситуации может реализоваться путем «*протрела*» преграды аналогично тому, как пробивает преграду *кумулятивная струя*. В зоне действия вполне могут существовать температуры и давления, необходимые для образования *алмазов* (образования *кимберлитовых труб*).

Рассмотренная схема развития процессов более характерна для образования океанических хребтов так называемого «атлантического типа». В этой схеме континентальная кора, обладая определенной прочностью, не растягивается под действием сил расширения, а рвется и раздвигается. Образовавшееся в результате раздвижения континентов пространство заполняется сформированной океанической корой.

Однако представим себе ситуацию, в которой континентальная кора была менее прочной и могла растягиваться. В этом случае наращивание океанической коры происходило бы отличным от предыдущего способом - от центра к окраинам образующегося океана. Астеносферная зона, занимая в начале процесса центральное место, по мере развития его преобразовалась в кольцевую форму (упрощенно), совмещающую с «берегом» континента. Возможно, что в результате действия такого процесса образовалась океаническая кора «тихоокеанского» типа в виде прочной жесткой «пластины» радиусом R и толщиной h . Края «пластины» жестко не закреплены и уходят под материк (на расстояние δ). В цикле расширения «пластина» выгибается, ее края выдвигаются из-под материка. При следующем цикле - сжатии - края «пластины» опускаются под материк (некоторая аналогия субдукции в плитной тектонике). В зоне контакта материк - «пластина»

могут возникать напряжения $\sigma = \frac{F_K}{S}$, где сила $F = mg$, m - масса пластины, $m = \pi R^2 h \rho$, ρ - плотность ее вещества, g - ускорение силы тяжести, $S = 2\pi R \delta$ - площадь контакта, K - коэффициент преобразования механической энергии в сейсмическую.

Оценим величину K . Известно, что суммарная энергия землетрясений равна примерно 10^{25} эрг/год. Будем считать, что вся она выделяется в зоне контакта «пластины» с материком. Потенциальная энергия «пластины» $P = mgv_r t$, $v_r t$ - амплитуда колебаний пластины (в настоящее время $v_r * t \approx 0,1$ см) оказывается около 10^{27} эрг/год (для $R = 5$ тыс. км, R - «радиус» тихоокеанской «пластины» $h \approx 5$ км, $\rho \approx 3$ г/см³, величина K - порядка $\approx 10^{-2}$). Получаемое значение напряжения σ (килобары) сравнимо по величине с напряжением разрушения горных пород и достаточно для «организации» землетрясения. Приведенная оценка (в рамках нашей модели) предлагает объяснение уникальному явлению на *Земле* - сосредоточению землетрясений на побережье Тихого океана. В зонах *океанических хребтов* подобного явления не происходит, так как в них *диссипация энергии расширения - сжатия* реализуется через *пластическое течение вещества*.

Образование поднятий (гор)

Если при расширении *Земли* и расплавлении мантийного материала раздвижения не происходит, возможен вынос магмы на поверхность *Земли* и образование поднятий (*гор*).

Оценим высоту поднятий и глубину их «*корней*». Для простоты представим, что *Земля* состоит из вещества, находящегося в двух состояниях: собственно *Земли* с плотностью ρ_3 ($\rho_3 = 5,5$ г/см³) и ее *оболочки* с плотностью ρ_0 ($\rho_0 = 2,7$ г/см³). Граница между *оболочкой (корой)* и *Землей* есть не что иное, как граница фазового перехода (для упрощения не учитываем некоторое различие в химическом составе). Пусть h_1 - толщина *оболочки (коры)* до начала образования поднятий, R_1 - радиус сферы, вплоть до границы фазового перехода между *оболочкой* и собственно *Землей*.

В результате процессов плавления, вызванных «*течением*» вещества, часть его в окрестности ослабленной зоны, через которую происходит вынос вещества на поверхность, переходит в расплавленное состояние, причем это справедливо как в отношении вещества оболочки с плотностью ρ_0 , так и в отношении вещества с плотностью ρ_3 . Очевидно, что в результате плавления граница между *Землей* и оболочкой исчезает. После окончания цикла расширения и образования поднятий, расплавленное вещество земли перейдет в кристаллическое состояние с двумя плотностями (согласно нашему допущению). При этом окажется, что вещество с плотностью ρ_0 будет занимать оболочку толщиной $h_2 > h_1$, причем оболочка h_2 включает в себя как *горы (поднятия)*, так и их «*корни*».

Докажем это утверждение. Примем, что $h_2 = h_1 + A + B$, где A - высота **поднятий**, а B - глубина их «**корней**». Радиус R_2 стал меньше, чем R_1 , причем $R_1 = R_2 + B$.

Рассмотрим два **куска**, имеющих равные площади S в основании. Высота конуса состоит из $R_1 + h_1$ в первом случае и $R_2 + h_2$ - во втором. Для сохранения момента **инерции** вращающейся **Земли** необходимо выполнение условия: $m_1 R_1^2 = m_2 R_2^2$. В нашем случае можно записать: $[B * \rho_3 + m * \rho_0] * R_2^2 = h_2 * \rho_0 * R_2^2$, полагая что $m = S * h * \rho$. Отсюда получаем: $A/B = \frac{\rho_3 - \rho_0}{\rho_0}$, так как $\rho_3 \approx 2\rho_0$, то $A/B \approx 1$, то есть высота **поднятий** примерно равна глубине их «**корней**».

По поводу полученной зависимости сделаем два замечания.

В океане ρ_0 (с учетом толщины слоя воды) несколько ниже, чем на материках. Это обстоятельство должно приводить к относительному увеличению высоты **гор (поднятий)** в океане и уменьшению глубины их **корней**.

При расширении **Земли** масса ее не изменяется, а объем растет, значит, величина ρ_3 падает. Следовательно, относительная высота **древних поднятий** должна быть больше.

Таким образом, выполнение условия сохранения момента при образовании **поднятий** ведет к выравниванию масс ($m_1 = m_2$: **условие изостазии**) за счет опускания границы фазового перехода между оболочкой с плотностью ρ_0 и **Землей** (ρ_3). Разделив в этом равенстве каждую часть на R_2^2 и умножив на G - **гравита-**

ционную постоянную, получаем условие равенства ускорения силы тяжести: $G \frac{m_1}{R_2^2} = G \frac{m_2}{R_2^2}$. Выполнение правила сохранения момента при образовании **гор** автоматически приводит к **изостазии** и равенству ускорения силы тяжести.

Итак, расширение **Земли** порождается **конденсацией** вещества внутреннего ядра. Механизм **конденсации** имеет пульсирующий характер и находит свое отражение в периодическом характере **тектонической активности**.

Каков же запас энергии на **Земле**? Масса вещества G -ядра оценивается как $\approx 3 * 10^{26}$ г, что соответствует примерно $4 * 10^{30}$ Дж. Если считать, что вся масса **Земли** $6 * 10^{27}$ г. в момент ее образования находилась в том же состоянии, что и вещество в G -ядре, то за пять миллиардов лет своего существования в обычное (**конденсированное**) состояние перешло 19/20 ее массы. Если же скорость **конденсации** считать равной средней, то вещество G -ядра перейдет в **конденсированное** состояние примерно за 250 млн лет. Но если расширение **Земли** происходит примерно по экспоненциальному закону и скорость **конденсации** примерно в 15-20 раз выше, этот срок соответственно сократится.

Список литературы

1. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М.: Наука, 1966.
2. Геофизика океана / под ред. О. Г. Сорохитина. М.: Наука, 1979. Т. 2.
3. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973.
4. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука, 1975.

УДК 519.6

Нина Ивановна Костюкова, Борис Григорьевич Михайленко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

МОДЕЛЬ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАСШИРЕНИЯ ЗЕМЛИ: ВАЖНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТОВ[©]

В настоящее время известны результаты ряда экспериментов, которые можно считать чрезвычайно важными для проверки нашей модели. Но для этой цели необходимы новые эксперименты (как натуральные, так и численные), с тем чтобы выяснить принципиальные моменты планетарной астрофизики, физики **Земли**, геодинамики и магнитного поля **Земли**.

Первый вопрос из области астрофизики, который необходимо решить для проверки модели, состоит в выяснении механизма образования планет и их спутников. Подходов к его решению может быть несколько.

Первый подход - разработка образования звезды (планеты) и, как следствие его, образование планет (спутников) на основе законов и правил механики сплошной среды (это, по-видимому, единственно правильный путь). Заметим, что аналитически задача определения динамики гравитационного сжатия газового