

От редколлегии: В публикуемой ниже работе В.В.Кузнецова обсуждается целый ряд основополагающих проблем в науках о Земле, которые касаются образования и развития твердой Земли: особенности фигуры Земли и следствия из этого, эволюция горячей расширяющейся Земли, ограничения на высоту гор, отрицается дрейф континентов и внутримантийная конвекция, необычно представлена геодинамика зон спрединга и субдукции. Объем работы и обзор современной литературы свидетельствует о длительной и целеустремленной работе автора над этими проблемами.

Утверждения автора оригинальны, но, к сожалению, противоречат сложившимся современным представлениям и вызывают активные возражения. Название статьи касается только части обсуждаемых проблем и не в полной мере отражает содержание работы.

Учитывая значительный объем проведенных исследований и широкий круг затронутых проблем, а также определенный авторитет автора в геофизике (известен ряд крупных публикаций автора), редколлегия считает возможной опубликовать на страницах «Вестника Отделения наук о Земле РАН» эту статью исключительно в порядке обсуждения, не разделяя взгляды и соображения автора.

ПРИНЦИП МИНИМИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЭНЕРГИИ ЗЕМЛИ И МЕХАНИЗМЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

В.В.Кузнецов

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатской обл.*

E-mail: vvk@ikir.kamchatka.ru

УДК 550.3

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2005/dis-1.pdf

Опубликовано 11 февраля 2005 г.

© 2005, Кузнецов В.В., ОНЗ РАН

Аннотация. Звезды, планеты и их большие спутники имеют форму шара, точнее, эллипсоида вращения. Этот, с первого взгляда ординарный факт, имеет под собой весьма не тривиальную физику и важные последствия, определяющие природу механизмов, действующих на звездах и планетах. Действие Принципа минимизации гравитационного потенциала приводит к стремлению всех космических объектов (звезд, планет и больших спутников), образовавшихся под действием сил самогравитации, минимизировать свою поверхность (поверхность геоида – на Земле) и принять форму шара (эллипсоида вращения). Принцип реализуется путем «течения» вещества поверхностного слоя твердых планет, которое на Земле принято называть геодинамикой. Геодинамика, т.е. движение материков и расширение океанов изменяет лик Земли и является причиной сейсмичности, вулканизма и образования гор и впадин. Выяснение причин и механизмов этого движения представляет одну из важнейших задач физики Земли.

гравитационная энергия, принцип минимизации, способы реализации

Abstract. Stars, planets with their satellites are having a spherical, to be exact, ellipsoid form. Though seeming to be a trivial well known fact, it does base on nontrivial physics and results in consequent mechanisms taking place at stars and planets. Application of the minimization method of gravitational potential is leading for each cosmic object, due to its auto-gravitational forces, striving to minimize its surface and to have a spherical form. This method is to simulate surface layer motion in solid planets. This process on the Earth is known to be a geodynamics. Being continents motion and expansion of the oceans, geodynamics is changing the Earth's face and is responsible for seismicity, volcanism and the mountains and cavity formation. To understand geodynamics is the main problem of the Earth physics.

gravitational energy, minimization principle, mechanisms of embodiment

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что Земля, все другие планеты Солнечной системы и семь больших спутников имеют форму шара. Однако мало кто обращает внимание на этот общеизвестный факт, который, тем не менее, указывает на то, что и Земля, и другие планеты подвержены действию какого-то механизма, приводящего к тому, что планеты принимают именно такую форму. Найти объяснение этому феномену в рамках общепринятой модели холодной Земли не удастся. Действительно, если пылинки и небольшие кусочки вещества, формируя Землю, будут слипаться вокруг одного из них, то почему образующийся в этом процессе «большой камень» должен принять форму шара? На такой, казалось бы, очевидный вопрос, общепринятая модель образования Земли ответа не имеет.

Рассмотрим принцип минимизации гравитационной энергии, выполнение которого выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Выполнение этого принципа предполагает, что вещество планеты после её образования изначально было очень горячим: частично, - расплавленным, частично, в газообразном (метастабильном, плазменном) состоянии. В процессе эволюции планеты её вещество остывало, конденсировавшись и кристаллизуясь. При этом, естественно, должен меняться и объем планеты, т.е. планета в течение эволюции ведет себя как динамическая система. В центре некоторых планет (на Земле, например) до сих пор сохранилось вещество в «первородном», газообразном, метастабильном состоянии. Вещество из метастабильного состояния превращается в обычное состояние, претерпевая фазовый переход первого рода: конденсация-испарение. Вещество при этом переходит в менее плотную, чем в момент образования, фазу, а сама планета – расширяется. Процесс эволюции планеты представляет собой череду сменяющих друг друга циклов расширения и сжатия, при преимуществе расширения над сжатием [1, 2]. Принцип минимизации действует только во время эволюции планеты, по окончании этапа эволюции, - действие Принципа прекращается.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Принцип минимизации “заставляет” планеты (в недрах которых ещё могут происходить фазовые переходы) стремиться к гидростатическому равновесию. Пути достижения этой цели известны, это дрейф материков, образование гор, сейсмичность и вулканизм. Действие принципа минимизации автоматически приводит к гравитационной дифференциации вещества планеты и т.д.

В чем причина движения материков, какова физика явлений, происходящих в зонах спрединга и субдукции, возможна ли глобальная конвекция в мантии или нет, почему сжатие Земли не соответствует её гидростатическому равновесию?

Эти и многие подобные вопросы не находят убедительного ответа в концепции плитной тектоники. В подтверждение сказанному приведем несколько примеров. Движение материков можно считать установленным фактом, однако, наличие корней материков и гор, которые должны бы были «цепляться» за «дно» и не давать скользить им по астеносфере, вызывают сомнения у многих геологов. Можно добавить сюда тот факт, что астеносфера представляет собой совсем не гипотетичный сплошной слой малой вязкости, как это предполагается в плитной тектонике. Астеносфера обнаруживается реально далеко не повсеместно, она присутствует только в некоторых регионах, в виде отдельных «пятен» не связанных друг с другом [3]. Более того, малая величина скоростей сейсмических волн и повышенная электропроводность астеносферы можно, например, объяснить совсем не расплавленным её состоянием, а лишь повышенной концентрацией водорода [4].

В зонах субдукции, где (согласно плитной тектонике) одна плита «ныряет» под другую, казалось бы, должно наблюдаться, что та часть плиты, которая находится ближе к зоне субдукции, должна быть «старше» другой части плиты, возраст которой моложе. Это один из основных постулатов плитной тектоники. Однако, любому, проявившему интерес к этой проблеме, не нужно большого внимания для того, чтобы убедиться, что в действительности это не всегда так. Обратимся к картам [5, 6] и увидим, что в районе Японии мезозойские инверсии M1, M2 и т.д., возраст которых 115 млн. лет, значительно ближе к зоне субдукции, чем инверсии M29, возраст которых 150 млн. лет. Вывод, который можно сделать из этого наблюдения, состоит в том, что плита скорее не «ныряет» под Японию в зоне глубоководных желобов, а наоборот, «вынырнула» оттуда примерно 100 млн. лет тому назад. Заметим, что ранее к аналогичному выводу пришел Чудинов [7], назвав это явление, в противовес общепринятому, - эдукцией. Глубоководные желоба, - это наиболее глубокие “шрамы” на поверхности Земли, полученные

более 100 млн. лет тому назад. По всей видимости, в настоящее время Земля стремится «залечить эти шрамы». Современная геодинамика, сейсмичность и вулканизм, это средства механизма такого «залечивания».

Тектоника плит, так же как идея железного ядра и гидромагнитного динамо, занимает в науках о Земле положение, идентичное тому, которое имеют в физике уравнения Максвелла, или теория относительности. Это ситуация явно ошибочна, например, тектоника плит (так же как и динамо), кроме многих прочих, не может ответить на самый элементарный вопрос: что представляет собой источник энергии, находящийся в недрах Земли, совершающий такие колоссальные перемещения её вещества, жесткость которого не уступает жесткости стали. Этот источник обеспечивает Земле тепловой поток и способность к генерации геомагнитного поля. Кроме этого, такие важные моменты физики Земли, как её негидростатичность, особенности свойств геоида, да и вообще тот факт, что Земля – шар, как-то выпали из области интересов плитной тектоники. В настоящей работе мы рассмотрим именно эти вопросы, и начнем с обсуждения очень привычного для нас факта, что Земля, - это шар.

1. ПРИНЦИП МИНИМИЗАЦИИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ЭНЕРГИИ

Гравитационный потенциал φ удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta\varphi = -4\pi G\rho. \quad (1)$$

Здесь G – гравитационная постоянная, ρ - плотность вещества. Решение уравнения (1) записывается в виде:

$$\varphi = G \int (\rho dV)/r + C, \quad (2)$$

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

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

$$W(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \xi(x, y, z), \quad (3)$$

где $\varphi(x, y, z)$ - потенциал сфероида, а $\xi(x, y, z)$ – возмущающий потенциал, т.е. часть потенциала, связанная с аномалиями силы тяжести. Уравнение (4) называется уравнением геоида, где $T = const$.

$$W(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \xi(x, y, z) = T. \quad (4)$$

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

$$\Delta n = N = -\xi / (\partial\varphi/\partial n) = \xi/\gamma, \quad (5)$$

где $\gamma = -\partial\varphi/\partial n$ – производная функции φ . Запишем основное уравнение гравиметрии, связывающее аномалии силы тяжести Δg с величиной возмущающего потенциала:

$$\Delta g = 1/\gamma (\partial\gamma/\partial n) \xi - \partial\xi/\partial n. \quad (6)$$

Уравнения (5, 6) показывают связь аномалии силы тяжести Δg с величиной возмущающего потенциала ξ и высотой геоида N .

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

$$\alpha \int dS = \min, (V = const). \quad (7)$$

Здесь α - поверхностное натяжение, S - площадь поверхности раздела фаз, V – объем шара. Приобретение телом шарообразной формы, как в случае самогравитации, так и при проявлении

поверхностных эффектов в жидкости, базируются на общем для обоих случаев принципе пространственной корреляции структуры вещества и эффекте возникновения дальнего порядка. Возникновение дальнего порядка (упорядоченной фазы) имеет в физике фундаментальный характер. Как при самогравитации, так и при образовании фазовой поверхности, частицы вещества «чувствуют» не только ближайших к ним соседей, но и весь их «ансамбль», Причиной возникновения дальнего порядка в самогравитирующей структуре может быть, например, континуальное вращение планеты, или, как показано в [8], негиббсовская термодинамика самогравитирующих структур.

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

Отсюда получим выражение принципа минимизации гравитационного потенциала:

$$G M dM/r \rightarrow \min. \quad (8)$$

Полученное выше равенство позволяет оценить величину α :

$$\alpha = G M z \rho/R. \quad (9)$$

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

Принцип минимизации гравитационной энергии планеты и его роль в процессах, происходящих на поверхности планеты, заключается в том, что площадь фазовой поверхности самогравитирующего шара радиусом R стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Ниже рассмотрим следствия, вытекающие из этого принципа и механизмы его реализации.

Как известно, сила поверхностного натяжения заставляет жидкость, находящуюся вне внешних сил, принимать форму шара, а жидкость, смачивающую поверхность сосуда, подниматься на высоту h около его стенки и т.п. Модель «растекающейся капли» иллюстрирует некоторые характерные моменты реализации Принципа. Представим себе, что капля жидкости в виде полусферы попадает на дно стакана с идеально смачиваемой поверхностью и вертикальными стенками, и начинает растекаться. Начальная высота капли H , радиус стакана R ($R \gg H$), поверхностное натяжение жидкости α , капиллярная постоянная $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$, g - сила тяжести, ρ - плотность жидкости. Объем капли $2/3\pi H^3$, объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана $\pi R^2 \delta$. Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим θ , высоту подъема жидкости - h . Поверхность растекающейся капли не плоская, а имеет некий радиус кривизны X , причем может оказаться, что в разных местах поверхности окажутся различные значения X ($X_1 \neq X_2$). Этот эффект приведет к появлению т.н. поверхностного лапласового давления Δp : $\Delta p = \alpha(1/X_1 + 1/X_2)$. При условии, что поверхность жидкости плоская и при условии: $X_1 = X_2 = \infty$, $\Delta p = 0$. Сила поверхностного натяжения заставляет жидкость подниматься вверх на высоту h около стенки сосуда:

$$h = a(1 - \sin\theta)^{1/2}. \quad (10)$$

Предположим, что в зонах субдукции и регионах образования гор происходят явления, близкие по характеру с краевыми эффектами при смачивании «стенки жидкой пленкой». Величину поверхностного натяжения α можно оценить, если воспользоваться формулой: $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$, капиллярную постоянную a можно получить из (10), подставив в неё данные для зоны субдукции, приведенные в [9]. Если принять величину краевого угла $\theta \approx 87^\circ$, а высоту $h \approx 6 - 8$ км, то, $a \approx 500 - 1000$ км. Полученное таким образом значение величины «поверхностного натяжения» литосферы соответствует предыдущей оценке: $\alpha \approx 10^{19}$ дин/см. (Для сравнения, α воды 70 дин/см).

Предположим, что поверхность тела отличается от сферической, и можно говорить о том, что фигуру тела можно описать двумя радиусами R_1 и R_2 (немного отличающимися друг от друга). В этом случае на поверхности тела возникает поверхностное давление $p(\alpha)$:

$$p(\alpha) = \alpha (1/R_1 + 1/R_2) \approx 2\alpha/R. \quad (11)$$

Это известная формула Лапласа. Отсюда следует условие равновесия поверхности:

$$1/R_1 + 1/R_2 = const. \quad (12)$$

Если поверхность тела свободна, то это условие означает, что тело должно иметь шарообразную форму. Выполнение условия равновесия поверхности Земли, следующего из соблюдения Принципа, без учета её вращения, приводит к тому, что Земля, вернее её геоид, стремится принять форму шара. Если учесть вращение, то равновесной формой Земли, - будет сфероид, эллипсоид вращения. Поверхностный слой Земли (но не вся Земля) достигнет гидростатического равновесия в тот момент, когда высота геоида в целом по Земле окажется равной нулю.

Если принять во внимание значение величины “поверхностного натяжения” литосферы α , ($\approx 10^{19}$ дин/см), то поверхностное, лапласово давление оказывается вполне существенным: $p(\alpha) = 10$ кбар. Такое давление способно “заставить” поверхностный слой литосферы растекаться, аналогично тому, как это происходит с каплей жидкости. Для сравнения, оценим величину давления $p(N)$, возникающего за счет «дефицита массы», образующегося за счет разности в радиусах эллипсоида вращения и геоида (высоты геоида N) [10]: $p(N) = \rho g N. = 30$ бар. (Реально, никакого «дефицита массы» быть не может, т.к. масса объема геоида равна массе объема сфероида). Величина $p(N)$ оказывается значительно (\sim в 300 раз) меньше $p(\alpha)$. Давление такой величины уже не может приводить к растеканию слоя литосферы по поверхности Земли. В свою очередь, давление $p(\alpha)$ стремится, в соответствии с Принципом минимизации гравитационного потенциала, минимизировать высоту геоида таким образом, чтобы Земля приняла форму эллипсоида вращения (сфероида). Соответствующая поверхностная сила и вектор скорости растекания литосферы ориентированы вдоль градиента геоида из областей, где высота геоида принимает максимальные значения $|N|$ в направлении области, в которой $N \rightarrow 0$. Эту область, где $N = 0$, область притяжения, - можно считать своеобразным аттрактором.

Рассмотрим, на каких объектах может проявляться действие Принципа. Можно ли оценить тот минимальный размер космического объекта, когда Принцип “начинает работать”? Следуя модели горячей Земли, далеко не любой космический объект способен “собираться в каплю” и принять форму шара. Это может произойти лишь в том случае, если выполняется правило: $GM/R \geq U_{II}$, где U_{II} - теплота плавления вещества планеты ($U_{II} \approx 1$ кДж/г). При этом R планеты (спутника) должен быть > 1 тыс. км. Таким образом, только 7 больших спутников и все планеты Солнечной системы подвержены действию Принципа. Надо заметить, что действие Принципа может проявляться до тех пор, пока вещество космического тела полностью не релаксировало, т.е. в его недрах еще осталось вещество в метастабильном состоянии, подобное тому, что находится во внутреннем ядре Земли [1, 2].

Решение (2) уравнения (1) устойчиво только в том случае, если плотность вещества гравитирующего шара не постоянна по радиусу. Определим распределение плотности гравитирующего шара, исходя из принципа минимизации гравитационной энергии [11]. Запишем требование минимума функционала, описывающего гравитационную энергию шара, в форме [12]:

$$\Omega = - 2\pi \int_0^R \varphi \rho r^2 dr, \quad (13)$$

где φ – гравитационный потенциал, $\rho = \rho(r)$ - плотность, R - радиус шара (планеты). Минимизировать функционал можно посредством преобразования функции $\rho = \rho(r)$. Эта функция должна удовлетворять заданным значениям массы планеты M и момента инерции I :

$$M = 4\pi \int_0^R \rho r^2 dr, \quad (14)$$

$$I = 8/3\pi \int_0^R \rho r^4 dr. \quad (15)$$

Определим распределение плотности по радиусу гравитирующего шара:

$$\rho_{max}(r) \geq \rho(r) \geq \rho_{min}(r), \quad 0 \leq r \leq R.$$

Для определения закона распределения плотности, удовлетворяющего принципу минимизации гравитационной энергии шара, эти условия необходимы и достаточны. Решение имеет вид [11,13]:

$$\rho(r) = \rho_{max}(r), \quad 0 \leq r \leq R.$$

Этот результат соответствует однородности планеты в начальном состоянии равновесия. Решение включает и тот случай, когда планета неоднородна, но компоненты ее вещества равномерно перемешаны. При этом возможно протекание процессов гравитационной дифференциации. (Заметим, что возникающий при этом вопрос о неизменности радиуса планеты принято считать очевидным и не подлежащим обсуждению).

Ситуация с возможным переносом (перераспределением) массы планеты в процессе её эволюции вполне обоснована. Оценим величину и направление перемещения массы вещества внутри планеты, которое привело бы к наименьшему значению гравитационной энергии при неизменной массе и моменте инерции. Отличием этой задачи от предыдущей является то, что ноль становится внутренней точкой области допустимых значений вариации $\delta\rho(r)$ для каждой точки $r_0 \leq r \leq R$. Решение задачи оказывается разрывным:

$$\begin{aligned} \delta\rho(r) &= \delta\rho_{max}(r), & 0 \leq r \leq r_G, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho(r), & r_G \leq r \leq r_0, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho_{min}(r), & r_0 \leq r \leq R. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\delta\rho_{max}$, $\delta\rho$, и $\delta\rho_{min}$ - границы области допустимых значений $\delta\rho(r)$, а r_0 и r_G - первая и вторая точки разрыва непрерывности вариации.

Согласно (16) однородная Земля превращается в многослойную. Это превращение может происходить только при увеличении объема Земли. Реализация принципа минимизации гравитационной энергии при постоянстве массы и момента инерции планеты - приводят к выводу об её расширении в процессе эволюции. Использование этого Принципа естественным образом ведёт к минимизации времени образования планеты, во-первых. Во-вторых, перемещение вещества планеты в радиальном направлении при превращении однородной модели в многослойную, автоматически, при соблюдении постоянства момента импульса, сопровождается перемещением массы в обратном направлении. Таким образом, Земля, как самогравитирующий шар, - это саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов.

2. ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ

Мандельброт [14], а за ним огромное количество авторов, показали, что Землю можно рассматривать как открытую самоорганизующуюся систему. Практически любой параметр Земли, будь то частота разливов Нила, соотношения между площадью поверхности и длиной береговой линии, между площадью поверхности и периметром облаков, будь то частота инверсий геомагнитного поля, или частота повторения землетрясений, - все эти параметры имеют нецелую фрактальную размерность. Все они показывают, что на Земле происходят (или происходили) процессы самоорганизации. Никто не возражает против этого утверждения, однако, это совсем не означает, что ясны конкретные причины и механизмы самого процесса самоорганизации. Принято считать [15], что самоорганизация происходит при взаимодействии двух процессов: переноса и диффузии (перколяции). В терминах теории самоорганизации [15], процессы, происходящие на Земле - такие как течение литосферы - это дрейф (перенос массы), а сейсмичность, вулканизм и образование гор, - явления, по своей физике, близкие к диффузии (просачиванию - перколяции). В качестве примера роли сейсмичности в процессе самоорганизации и минимизации гравитационного потенциала, сошлемся на серию работ Чао и Гросса (Chao, Gross) [16-18]. Авторы считают, что землетрясения, кроме энергии диссипации, выделившейся при разрушении, переносят значительное количество энергии и перераспределяют её между вращением Земли, упругим полем, гравитационным полем и теплом. Авторы вычислили косейсмическое изменение глобальной гравитационной энергии, индуцированной 11015 большими землетрясениями, которые произошли с 1977 по 1993 г.г. Чао и Гросс полагают, что эти землетрясения привели за это время к весьма заметному (около 2×10^{12} Вт) уменьшению вели-

чины гравитационной энергии Земли. Это значительно больше, чем та доля энергии, которая пошла за это время на увеличение скорости вращения Земли (6.7×10^9 Вт) и больше энергии сейсмических волн (4.7×10^9 Вт).

Земля, как и ряд других объектов Космоса, весьма специфический объект – это самогравитирующее тело, каждая частица которого «чувствует» любую другую [8], а не только, как это принято в термодинамике Больцмана, ближайшую к себе частицу. Кроме этого, все частицы такого тела вращаются как одно целое. Возможно, оба этих фактора обеспечивают дальний порядок гравитирующей самоорганизующейся системе. Параметрами порядка в такой системе могли бы быть, например, фрактальная размерность аномалии силы тяжести или фрактальная размерность высоты геоида [19].

Самоорганизующуюся систему можно описать уравнением Фоккера – Планка (ФП):

$$\begin{aligned} \partial f(q, t) / \partial t &= - \partial j / \partial q, \\ j &= d(\gamma q f) / dq + 1/2 Q d^2(f) / dq^2, \end{aligned} \quad (20)$$

где $K = \gamma q$ - коэффициент дрейфа, а Q - коэффициент диффузии. Предположим, что в нашей задаче коэффициент K характеризует течение (дрейф) литосферы, а Q - процессы сейсмичности, вулканизма и образования гор, т.е. процессы «просачивания» (перколяции).

При решении уравнения ФП находятся стационарные решения, когда аргумент не зависит от времени, либо находятся решения, зависящие от времени, но не зависящие от координаты.

Стационарное решение уравнения ФП для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$f(q) = N' \exp(-2V(q)/Q), \quad (21)$$

где $V(q) = - \int K(q) dq$, имеет смысл потенциала, а N' - нормировочный множитель. Физический смысл решения уравнения ФП, это получение зависимости вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия землетрясения или вулкана, высота горы и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения. Эта особенность (её называют “1/f” фликкер-шумом) является фундаментальным свойством природы. Например, график повторяемости землетрясений, известный как закон Гутенберга-Рихтера, - фликкер-шум [20]. Он показывает, что в открытой диссипативной структуре, имеющей целью минимизировать гравитационный потенциал (минимизировать высоту геоида), происходят процессы самоорганизации. Т.о. мы приходим к важному выводу: реализация принципа минимизации высоты геоида и стремление планеты к установлению гидростатического равновесия, это, по сути, одни и те же явления самоорганизации. Рассмотрим, можно ли найти некий «общий знаменатель» этих явлений?

Преобладающее большинство объектов, присущих Природе, обладает дробной, фрактальной размерностью. Фрактал, это мгновенный “срез” самоорганизующегося процесса. Хаусдорфова фрактальная размерность множества:

$$D_H = \lim \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}. \quad (22)$$

Здесь $N(r)$ – число событий интенсивностью r . Величина D_H характеризует процесс самоорганизации: чем она меньше, тем более высокая степень самоорганизации. Так, например, эта величина имеет вполне определенное значение, характеризующее процессы, происходящие в некотором регионе. Она может отличаться от D_H в другом регионе, и D_H в целом по Земле. Этот факт хорошо изучен для землетрясений. По-видимому, аналогичная зависимость должна наблюдаться и для других динамических параметров Земли, таких как интенсивность вулканизма, высота гор, особенности рельефа. Сравнение пространственного распределения сейсмичности, высоты гор или особенностей рельефа с распределением высоты геоида показывает, что простой корреляции параметров не наблюдается. Земля стремится минимизировать именно высоту геоида, т.е. стремится перераспределить массу своего вещества таким образом, чтобы это распределение по объему Земли соответствовало простой фигуре – эллипсоиду вращения.

К сожалению, в базах данных о параметрах Земли нет информации относительно соотношения высот геоида N и соответствующей этой высоте площади поверхности S . Это не дает возможность построить зависимость D_H , как предел отношения $\ln S / \ln(1/N)$, и определить его величину. Анализ карт высоты геоида показывает, что чем больше величина $\pm N$, тем меньше соответствующая ей S . На основании последнего предположим, что высота геоида величина

фрактальная, Тогда, в соответствии с принципом минимума фрактальной размерности [19], согласно которому увеличение степени самоорганизации системы приводит к понижению её размерности, уменьшение (по модулю) высоты геоида эквивалентно превращению трехмерной структуры в двумерную. Таким образом, минимизация высоты геоида понижает размерность системы (до топологической, равной двойке). В этом плане, минимизация гравитационного потенциала Земли, с одной стороны, и её самоорганизация, с другой, это одна и та же процедура, выраженная в различных терминах.

3. СЖАТИЕ ЗЕМЛИ

Сжатие Земли $\varepsilon = (a - c)/a = 1/298.25$, a - экваториальный, c - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию: $1/\varepsilon = a/(a - c)$. Центробежное ускорение на экваторе $g_\omega = 3.39 \text{ см/с}^2$. Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести Земли: $h = g_\omega/g = 1/289$. Сжатие жидкой Земли определяется из уравнения Клеро: $4/5\varepsilon_g = \alpha$, откуда $\varepsilon_g = 1/232$ (оценка Ньютона). Обычно, для сравнения с $\varepsilon = 1/298$, приводится оценка по модели Гюйгенса [21], полагавшего, что вся масса Земли сосредоточена в её центре, т.е. радиус Земли $a = 0$. Тем не менее, принято считать, что можно оценить степень сжатия Земли по модели Гюйгенса: $\varepsilon_g = 1/2 [\omega^2 a^3 / (GM)] = 1/578$ (у Буллена, $\varepsilon_g = 1/580$). Но ведь по модели Гюйгенса $a = 0$! Далее делается неправильный вывод: Так как обратное сжатие Земли (1/298) занимает промежуточное положение между 1/232 и 1/578, то это якобы говорит о характере распределения плотности по радиусу Земли, что неверно.

Д.Ф.Эвернден [22] показал, что Земля сплюснута намного меньше, чем её жидкая модель. Автор объясняет реальное сжатие Земли значительно большей, чем ранее предполагалось, прочностью нижней мантии, а совсем не текучестью её вещества. Более того, он пытается доказать, что прочная мантия Земли сохраняется со времени её образования. Эвернден попутно доказывает, что знание параметров фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Г. Джеффрис [23] полагал, что Земля гидростатична. Однако при этом условии должно выполняться правило: $1/H \approx 1/\varepsilon [H = (C - A)/C]$, где C и $A = B$ - полярный и экваториальные моменты инерции Земли, $\varepsilon = 5/4 \times \omega^2 a^3 / GM$ - сжатие Земли, ω - скорость её вращения. Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом $T = 24$ часа, выполняется при: $1/\varepsilon = 232$. Как известно, у Земли: $1/H = 305.5$, $1/\varepsilon = 297.8$ и $1/H - 1/\varepsilon = 7.8$, а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток T для планеты, имеющей размер Земли и её среднюю плотность, должна быть равна: $T = 27.2$ часа, а не $T = 24$, как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения T соответствует $1/\varepsilon = 232$. Для $T = 22$ часа, Эвернден подсчитывает: $1/\varepsilon = 200$. Он приходит к заключению, что если Земля замедляет свое вращение, то её сжатие не будет уменьшаться до тех пор, пока длина суток T не станет: $T \geq 27.2$ часа. Или, если Земля вращалась в прошлом быстрее, и её возможная жидкая конфигурация была более сплюснутой, чем сейчас, но её реальное сжатие было бы таким же, как сейчас. Эвернден полагает, что Земля никогда не имела сжатия 1/232 и формулирует следствия из этого вывода:

- 1) У Земли очень высокая прочность нижней мантии;
- 2) Температура нижней мантии никогда не достигала значений, при которых возникает заметная текучесть под действием ротационных напряжений, т.о. исключается конвекция в нижней мантии;
- 3) Высокая прочность мантии требует, чтобы земное ядро было связано с верхней мантией и корой только с помощью кондуктивного (неконвективного) теплового потока;
- 4) Глубинные мантийные плюмы не могут существовать;
- 5) Отрицая мантийные плюмы, следует отвергнуть гипотезу о том, что граница ядра является источником иридия.

Заметим, что сделанные Эвернденом выводы излишне категоричны и противоречат наблюдениям. Например, группой сибирских геофизиков под руководством С.В.Крылова [24], с использованием методов глубинного сейсмического зондирования, обнаружено, что астеносферная зона под Байкалом “простреливает” всю толщу мантии от её границы с ядром до земной

коры. Этот выдающийся в физике Земли результат явно противоречит выводам Эверндена. Можно привести и другие примеры, но проблема, поставленная Эвернденом, остается.

Парадокс Эверндена разрешается в модели горячей Земли [1, 2]. В этом случае $\varepsilon = 1/298$ показывает, что Земля расширялась в течение времени эволюции, проходя все значения $1/\varepsilon$, а степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Необходимо выяснить, почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой, с $1/\varepsilon = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать? По видимому, раньше Земля была сплюснута в большей степени, чем сейчас и, по мере уменьшения скорости её вращения, «отслеживала» скорее не изменение ω , а dR/dt .

Рис.1 демонстрирует пространственную корреляцию акустических свойств внутреннего ядра и мантии, а так же высоты геоида. При этом внешнее ядро не обладает таким очевидным совпадением пространственного распределения своих акустических свойств с аналогичным распределением свойств внутреннего ядра и мантии.

4. ВЫСОТА ГЕОИДА

Построим распределение высот геоида по данным [25] и сравним его со структурой внутреннего ядра и мантии, полученной по результатам интерпретации данных по анизотропии сейсмических свойств мантии и внутреннего ядра [2, 26]. На рис. 1-а показан “срез” по экватору: анизотропии внутреннего ядра (1), мантии (2) и высоты геоида (3), и рис. 1-б: те же данные для “среза” по меридиану. Здесь, в качестве положительных отклонений от круга, приняты: понижение скоростей Р-волн и уменьшение величины плотности, - для внутреннего ядра и мантии, и увеличение высоты геоида. Можно наблюдать очевидную асимметрию структуры Земли, как пространственную корреляцию свойств внутреннего ядра, мантии и высоты геоида.

Причину корреляций оболочек Земли, в рамках горячей модели [1 2], можно объяснить тем, что фазовый переход, который происходит на границе внутреннего ядра, наиболее интенсивен в областях раскрытия океанов: Атлантического и Тихого. В областях фазового перехода происходит разуплотнение вещества внутреннего (G) ядра и должно наблюдаться уменьшение плотности и скорости Р-волн, т.к. на границе G-ядра их скорость резко понижается. Это разуплотнение наблюдается и в мантии. По-видимому, именно оно приводит к увеличению высоты геоида, которая (как положительная, так и отрицательная), в соответствии с принципом минимизации гравитационной энергии, должна уменьшаться в процессе эволюции Земли. Возможно, реализация этого принципа в процессе эволюции и саморазвития, приводит к тому, что наибольшая сейсмичность Земли наблюдается в областях, близких к нулевым высотам геоида, где происходит его выравнивание. Именно здесь находятся зоны столкновений, коллизии, или - зоны субдукции.

Обратим внимание на форму геоида. Авторы [25] выделяют два четко выраженных максимума высоты, приходящихся примерно на экватор, нулевой, и 180-ый градусы долготы. Максимумы соответствуют Тихоокеаническому поднятию и зоне спрединга в Атлантическом океане. Можно выделить два минимума, один южнее острова Цейлон (90° E) и другой, менее выраженный, в области 300° E (в Бразилии). Полюса, как северный, так и южный, попадают в область отрицательных высот геоида. Особенности геоида отражены на рисунке 1, где наибольший диаметр (3) показывает сечение высот геоида по экватору (слева) и по $0-180^\circ$ меридиану (справа). Масштаб отклонения высот (максимальное превышение 100 м) увеличен для наглядности и не соответствует размерам Земли, изображенной на рисунке. Здесь же показаны аналогичные сечения Земли, построенные по данным splitting-функций для внутреннего ядра (внутренний круг - 1) и мантии (средний круг - 2).

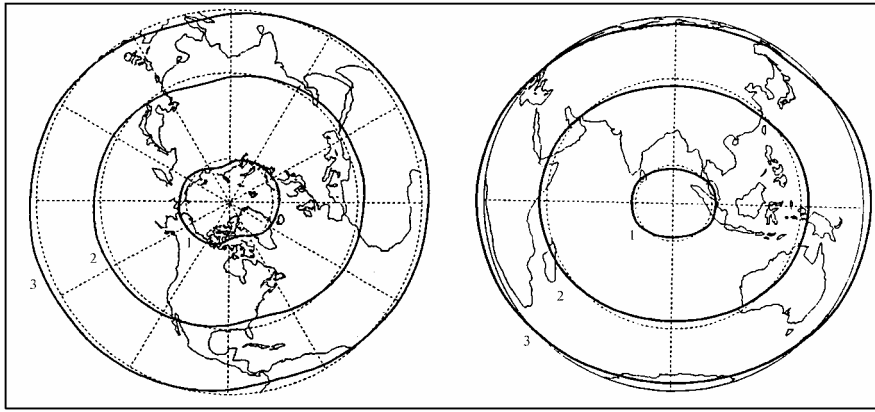


Рис. 1. Высота геоида (3), особенности акустических свойств мантии (2) и внутреннего ядра (1), полученные при анализе splitting-функций собственных колебаний для двух поперечных сечений Земли.

Метод построения и анализа splitting-функций (split - расщеплять) расщепления спектров собственных колебаний Земли (СКЗ) состоит в анализе СКЗ, возникающих после сильных землетрясений [2, 26]. Спектр СКЗ достаточно сложен и содержит большое количество мультиплетов. Мультиплеты возникают (что естественно) за счет несферичности Земли, связанной с её вращением, но, как выяснилось, в СКЗ имеются совсем другие мультиплеты, которые несут информацию об особенностях строения внутренних оболочек Земли вплоть до внутреннего ядра. Структуры, построенные по splitting-функциям внутреннего ядра и мантии, очень похожи друг на друга. В каждой из них хорошо видно два положительных максимума в распределении плотности и скоростей сейсмических волн и два минимума. Максимумы, как и в картине высот геоида, совпадают с центром Тихого океана и экваториальной зоной Атлантики. Минимумы располагаются примерно симметрично между максимумами. В целом и внутреннее ядро и среднее сечение мантии, весьма напоминают особенности геоида. Это нашло отражение и на рисунке, где видно, что структура внутреннего ядра, мантии и геоида очень близки, практически идентичны. Заметим, что совсем по-другому выглядит splitting-функция внешнего ядра [2, 27]. Здесь можно четко выделить 12 конвективных ячеек и тогда конвективная структура внешнего ядра напоминает сферическое колебание с тессеральной гармоникой типа P^3_4 .

Отклонения высоты геоида относительно земного радиуса составляют $\approx 10^{-5}$. Вариации параметров скоростей и плотностей во внутреннем ядре и мантии, полученные по splitting-функциям, составляют не более $\pm 0.2\%$. Для сравнения с геоидом, выразим эти вариации в расстояниях, под которыми будем понимать вариации радиуса соответствующей оболочки от некоторого среднего значения. Используем для этого известные значения градиентов скорости dv_p/dR в области вариаций splitting-функций. Изменение значений splitting-функций на 0.2% , при градиенте скорости $dv_p/dR = 1 \text{ км/с} / 100 \text{ км}$ и величине скорости $v_p \approx 10 \text{ км/с}$ эквивалентно расстоянию $\Delta R = 2 \text{ км}$ или $\approx 10^{-3}$. По-видимому, это может говорить о том, что степень стратификации Земли, её ядра и мантии, составляет примерно 0.2% , в то время как геоид «уравновешен» со значительно лучшей точностью. Этот факт свидетельствует о том, что в минимизации высоты геоида и гравитационной энергии принимает участие только самая верхняя часть литосферы, возможно, только земная кора.

5. ДРЕЙФ МАТЕРИКОВ

Рассмотрим, что принципиально нового может дать наш подход для объяснения особенностей дрейфа материков. Обратимся к двум экспериментально изученным примерам: дрейфу Тихоокеанической плиты в зоне субдукции и движению Индостана (Аравийской плиты) к северу и образованию Гималаев, Тянь-Шаня и Алтая. В первом примере (дрейф Тихоокеанической плиты), примем скорость «растекания» литосферы $v \approx 10 \text{ см/год}$, а скорость убывания высоты геоида $dN(x)/dt \approx 10^{-3} \text{ мм/год}$ [28]. Это означает, что собственно «течет» только самый верхний и сравнительно тонкий слой литосферы. Толщину слоя (z) можно оценить, если воспользоваться теорией поверхностных явлений [29] и, конкретно, примером, описывающим течение тонкого слоя жидкости со скоростью $v(z)$ по твердой поверхности, где $v=0$ ($z=0$):

$$\eta v \sim -z(d\alpha/dr), \quad (23)$$

где η вязкость вещества слоя литосферы ($\eta \approx 10^{24}$ Пз), $v \approx 10^{-7}$ см/с, z - толщина слоя, $d\alpha/dr \approx 10^{10}$ дин/см² (10 кбар) - изменение поверхностного натяжения вдоль слоя. Отсюда $z \approx 10$ км. Скорость горизонтального течения литосферы [28] v_x :

$$v_x = \rho g^2 / (8\pi\eta G \Delta\rho z) \times \int_A^B N(x) dx, \quad (24)$$

где ρ - плотность слоя, $\Delta\rho$ - разность между плотностью вещества слоя и плотностью земной коры, g - сила тяжести, G - гравитационная постоянная, $N(x)$ - высота геоида на расстоянии x между точками А и В. Упрощая и подставляя привычные значения величин, получаем для v_x : $v_x \approx 0.1 N(x)$ см/год (где N в метрах). Эта оценка дает верный результат для скоростей течения литосферы в Тихом океане.

Дрейф Тихоокеанической плиты, обладающий максимально большими скоростями (≥ 10 см/год), имеет направление вдоль градиента геоида [30]. Связь направлений дрейфа плит с градиентом геоида была выявлена автором раньше, еще по данным лазерной локации спутников и РСДБ [10]. Определения скоростей дрейфа материков и плит, выполненные с использованием систем GPS, уточнили и подтвердили данные, имеющиеся в нашем распоряжении. Анализируя данные работы [30] видно, что плиты дрейфуют не в область минимума высоты геоида, а к его нулевой отметке (аттрактору). Так наблюдения, проведенные на китайском пункте Хян и ряде других пунктов, где высота геоида принимает отрицательное значение (репелер), показали, что они перемещаются навстречу Тихоокеанической плите, вдоль градиента геоида в направлении большей его высоты (рис. 2). На вставке, в правом нижнем углу рисунка 2, приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии [31]. Можно видеть, что северный остров Японии Хоккайдо дрейфует в том же направлении, что и Тихоокеаническая плита, в то время как южный остров Кюсю дрейфует в противоположном направлении, как будто он находится на Азиатской плите. В центральной части Японии, на острове Хонсю фиксируются встречные направления дрейфа, как будто какая-то сила сжимает Японию в этой части. Эта картина могла бы найти объяснение в рамках наших представлений, если бы линия нулевой высоты геоида проходила бы вдоль Японии так, как это показано штриховой линией (аттрактор) на рисунке 2. Однако реально положение Японии относительно этой линии не соответствует минимальной высоте геоида [32], хотя зонам субдукции, в целом по Земле, соответствует понижение высоты геоида до отметки, близкой к нулевой. Возможная причина этого несовпадения заключается в том, что гидростатическое состояние Земли не точно соответствует нулевой отметке высоты геоида.

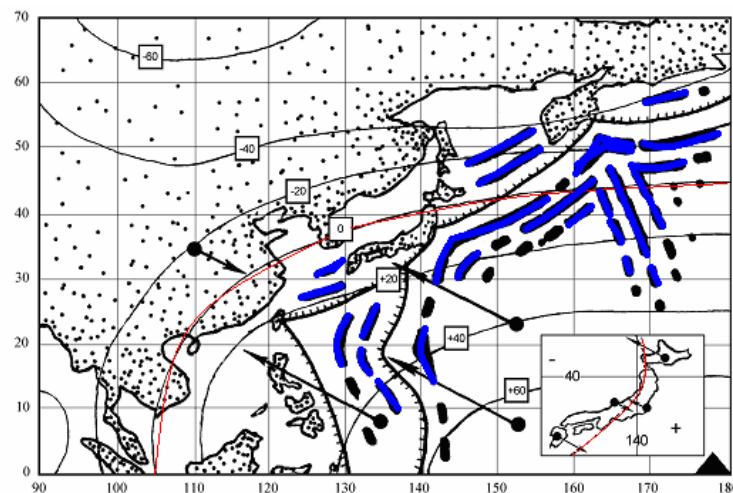


Рис. 2. Карта высот геоида, гравитационных аномалий, направлений и величин дрейфа материков и плит [25, 28, 30]. Черный треугольник внизу справа соответствует максимальному значению высоты геоида. Во вставке (правый нижний угол рисунка) показаны направления скоростей дрейфа литосферы, измеренные в Японии с помощью GPS-системы [31]. Штриховая линия, это линия геодинамического равновесия (аттрактор). При достижении равновесия встречные скорости дрейфа равны нулю.

Приведем некоторые оценки вертикальных перемещений плит в области максимальных величин высот геоида. Как показал Маслов [28], одному метру геоида (при вязкости материала плиты порядка 10^{24} Пз) соответствует скорость изменения его высоты, равная 0.002 мм/год. Если использовать эту оценку для максимальной величины высоты геоида, то окажется, что скорость вертикального перемещения здесь, порядка 10^{-2} см/год, что в 1000 раз меньше чем скорость горизонтального переноса.

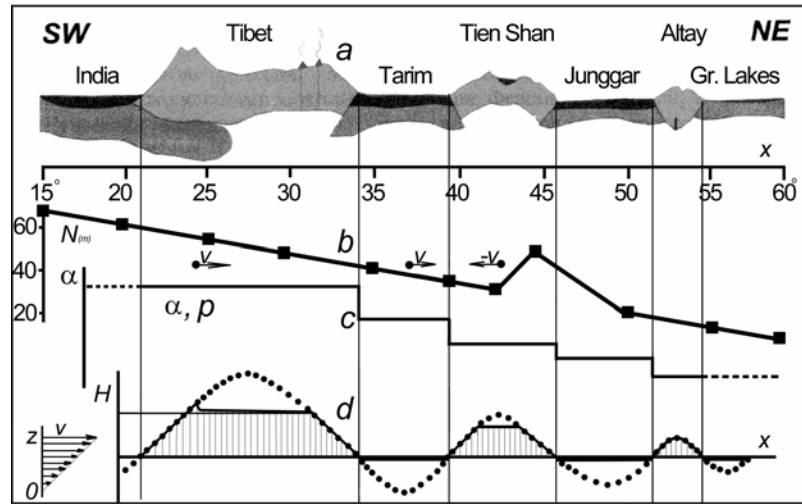


Рис. 3. Схема горных районов центральной Азии (рис. 3-а) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N – в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (3-б) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы α и величины сдвигового (лапласового) давления p вдоль профиля (3-с). Модельные представления (3-д).

На геодинамической карте [6] в районах Курильского и Алеутского желобов изображены протяженные аномалии силы тяжести. Эти аномалии представляют собой периодические структуры, с характерным поперечным размером («длиной волны») порядка 200 - 400 км, которые «затухают» на расстоянии меньшем, чем 1000 км, от названных желобов (см. рис.2). Картина гравитационных аномалий, как отмечал Маслов, напоминает эффект интерференции волн, «набегающих» и отраженных от желобов. Он же обратил внимание на то, что аналогичная волновая картина наблюдается ещё и на восточной границе плиты Наска, т.е. в прямо противоположном направлении от Курильской дуги.

Похожую на описанную выше «волновую картину», возникшую в литосфере, можно увидеть, если обратиться к схеме горных районов центральной Азии, таких как Тибет, Тянь Шань и Алтай (рис. 3-а). По мере того, как мы удаляемся от Индии к северо-востоку, грандиозность горных массивов убывает. Вслед за горными массивами следуют межгорные впадины. По мере приближения к северу Азии уменьшается модуль высоты геоида, причем в районе $42^\circ N$ высота геоида начинает немного возрастать и затем понижается до нулевой отметки, которая приходится на северную границу Азиатской плиты (рис. 3-б). Рис. 3-а показывает, что характерные размеры этой «волновой картины» превышают размеры, следующие из похожей «картины» в зоне субдукции, в несколько раз, высоты гор h и величины краевых углов θ так же выше и, более того, различны для различных горных районов. Воспользовавшись формулой (10) можно оценить величину капиллярной постоянной a и, вслед за этим, величину «поверхностного натяжения» α (по формуле: $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$). Рисунок 3-с показывает, что и величина α , и давление p , уменьшаются по мере уменьшения модуля высоты геоида. Это может означать, например, что вдоль оси x линейно меняется упругая сжимающая сила. На рис. 3-д показана (точками) некоторая аппроксимация ситуации, согласно которой действие упругой механической силы вызывает возбуждение пространственных «колебаний» в диссипативной среде. Амплитуда этих «колебаний» связана с изменением рельефа (высоты гор) вдоль направления x действия силы. Реальная высота гор на Земле, как видно из сравнения рис. 3-а и 3-д, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы. Предположим, что кривая, отображенная на рис. 3-д точками является решением некоторого дифференциального уравнения, описывающего геодинамику, приводящую к течению материка и образованию гор, как периодических функций в x -пространстве. Аналогом рассматриваемой нами задачи может

быть, например, механическая система [33], в которой ползун находится на механическом ремне, двигающемся с постоянной скоростью v_0 . Ползун прикреплен к неподвижной точке при помощи упругой пружины, создающей упругую силу, изменяющуюся по линейному закону. Если скорость v_0 будет выбрана соответствующим образом, то ползун может совершать прерывистые колебания. Такое поведение ползуна связано с тем, что сила трения (в нашем случае, - вязкость литосферы) между ползуном и ремнем не будет величиной постоянной, а будет изменяться в зависимости от s (ds/dt - скорость скольжения ползуна относительно ремня). Скорость скольжения можно записать:

$$ds/dt = dp/dt - v_0. \quad (25)$$

Здесь p – амплитуда прерывистого движения ползуна. Уравнение движения ползуна будет иметь вид:

$$m(\partial^2 p / \partial t^2) + \varphi(dp/dt - v_0) + kp = 0. \quad (26)$$

Следуя книге Дж. Стокера [33], введем новую переменную x , заменив p при помощи соотношения:

$$x = p + 1/k (-v_0). \quad (27)$$

Это соотношение означает, что положение ползуна отсчитывается от точки, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения. В нашем случае, положение точки равновесия определяет максимум функции, изображенной на рис. 3-d, и означает, что в первой (по оси x) точке равновесия будет возникать упругая сила, приводящая не к горизонтальному смещению слоя, а к его вертикальному перемещению, т.е. образованию гор.

Уравнение, типа уравнения Ван дер Поля [33], которое может подойти для описания нашего случая, и соответствовать решению 3-d, можно записать в виде:

$$m\partial^2 x / \partial t^2 + F(dx/dt) + kx = 0, \quad (28)$$

где

$$F(dx/dt) = \varphi(dx/dt - v_0) - \varphi(-v_0) \quad (29)$$

отрицательна при $dx/dt = 0$. Это требование будет выполняться, если скорость v_0 такова, что величина трения (вязкости) будет уменьшаться при возрастании v_0 . При этом возникают вертикальные автоколебания сплошной среды, которые могут быть причиной образования гор и впадин.

6. ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ДРЕЙФА КОНТИНЕНТОВ

Считается, что примерно 600 млн. лет назад на Земле, на месте современной Северной Атлантики, возник океан шириной около 2-х тыс. км, названный Япетусом. Он отделял Северную Америку от Африки-Европы. Океан сначала разрастался, а затем стал поглощаться в зоне субдукции. Это привело снова к сближению Африки и Европы с Северной Америкой. Несостоятельность этой гипотезы доказывает С. Кэри [34, 35]. Он тщательно анализирует все геологические и палеомагнитные данные и приходит к выводу, что этого мифического океана никогда на Земле не было. Изучение акватории Мирового океана показало, что имеются как общие черты для трех океанов (Тихого, Атлантического и Индийского), так и некоторые, весьма существенные отличия Тихого океана от других (об этом ниже). Расчеты, приведенные в книге Е.М. Рудича [36], показывают, что за последние 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке на 580 млн. км³. (При глубине океана порядка 4 км, это составляет примерно 1/3 всей поверхности земного шара). Резкое увеличение впадины Мирового океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины Мирового 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» (с. 232 [36]).

Р. Мезервей более 30 лет тому назад показал, что получить согласие между современной топологией материков и океанов и палеомагнитными данными, такими как дрейф магнитных полюсов и полосовые магнитные аномалии в океанах, можно только на расширяющейся Земле [37]. “Соединение” материков в Гондвану, в которой Африка, Южная и Северная Америки, Австралия и Антарктида, - образуют единый праматерик, невозможно на земном шаре, имеющем радиус, равный современному. Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположен-

ные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 4). Для того чтобы образовать Гондвану (рис. 4-а), этим материкам пришлось бы двигаться вдоль направлений, показанных на рисунке 4-б, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит его палеореконструкциям. Как показано многими авторами [1, 7, 38, 39], материки можно «уложить» один к другому практически без зазоров на шаре радиусом, точно равным радиусу внешнего ядра Земли (рис. 4-с). Для убедительного доказательства этого факта, доктор К. Фогель изготовил прозрачный глобус, внутри которого на шаре, эквивалентном шару внешнего ядра, располагались те же самые материки, что и на самом глобусе [39]. Глобус Фогеля демонстрирует, как изменялось положение материков, от начального, в момент образования Земли, до - современного.

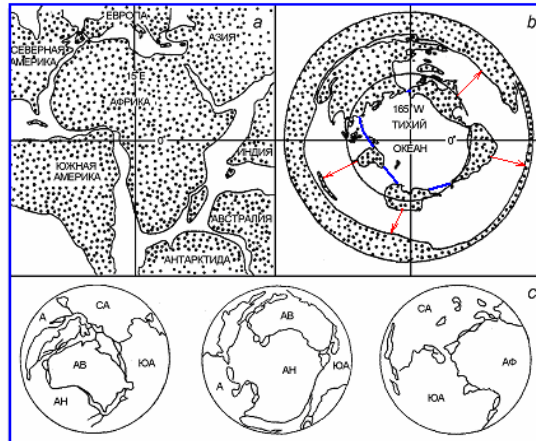


Рис. 4. Предполагаемое первоначальное расположение материков (а); экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления дрейфа материков (б) [37]. Расположение материков на сфере радиусом, равным радиусу внешнего ядра Земли (с) [38].

7. ЭВОЛЮЦИЯ ГОРЯЧЕЙ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛИ

В момент образования Земля представляла собой горячий ($T \approx 30\,000\text{ K}$) шар радиусом равным радиусу внешнего ядра. После окончательного формирования Земля начала охлаждаться, причем, этот процесс продолжается и в наше время. На первом этапе остыла и кристаллизовалась внешняя оболочка Земли - прообраз материковой, гранитной коры. Вещество Земли, находящееся в начале эволюции в газообразном (плазменном) состоянии, конденсировалось, образуя вещество внешнего ядра, и кристаллизовалось, - формируя мантию, при этом расширяясь. В эволюции Земли непосредственное участие принимают два экзотермических фазовых перехода: конденсация (на границе внутреннего ядра) и кристаллизация (на границе - внешнего). Скорость эволюции Земли на первом этапе определял процесс кристаллизации вещества мантии, который «контролировался» кондуктивным теплопереносом - температуропроводностью $\chi = \lambda/\rho c_p$ (ρ - плотность, λ - коэффициент теплопроводности). По началу, наращивание мантии происходило очень медленно: $l \sim (\chi t)^{1/2}$, t - время эволюции. Так продолжалось до тех пор, пока ее толщина l не стала достаточной для того, чтобы в мантии возникла конвекция ($l \geq l^*$) и «заработал» конвективный теплоперенос, более эффективный, чем кондуктивный. Конвекция в слое толщиной l между двумя плоскостями, между которыми поддерживается постоянный перепад температуры ΔT , возникает при числе Релея $Ra > 1710$:

$$Ra = (g \beta l^3 \Delta T) / (\nu \chi). \quad (30)$$

Подстановка характерных для вещества мантии Земли величин ускорения силы тяжести g , коэффициента объемного расширения β , кинематической вязкости ν , и χ , для $\Delta T = 10^4\text{ K}$ определяет величину $l^* \approx 300\text{ км}$. (Эта оценка совпадает с нашей оценкой толщины кристаллизовавшейся мантии).

Для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в мантии) произведение чисел Рейнольдса $Re = (\nu_k l)/\nu$ и Прандтля $Pr = \nu/\chi$ пропорционально корню квадратному из числа Релея: $Re \times Pr \sim Ra^{1/2}$. В свою очередь, число Релея $Ra \sim l^3$. Подставляя, получаем зави-

симось 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.

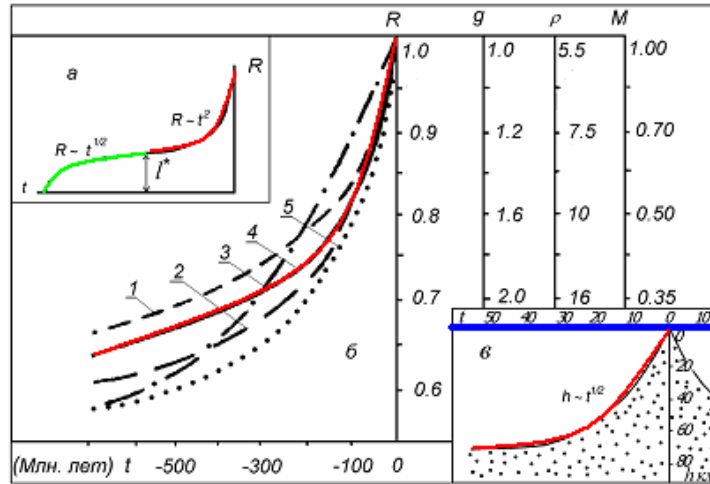


Рис. 5. Изменение земного радиуса R : а) - в течение всего периода эволюции; б) – в течение последних 500 млн. лет эволюции (по данным Кери – 1, Хильденберга – 2, Оуэна – 3, нашей модели – 4) [1]; g - сила тяжести, ρ - средняя плотность Земли 5 – увеличение массы океанов M ; в) – изменение глубины астеносферы h в зоне СОХ, в зависимости от её возраста t .

На рис. рис.5-а показано, что в течение примерно 3.5 – 4 млрд. лет толщина мантии увеличилась от нуля до 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, О.С. Хильденберг, Х. Оуэн и др. Рисунок 5-б демонстрирует зависимость земного радиуса от времени эволюции как согласно моделям этих авторов так и, для сравнения, нашу модель ($\Delta R \sim t^2$). Радиус Земли однозначно связан с величиной силы тяжести и средней плотностью планеты, что показано на рис. 5-б. Согласно модели, увеличение радиуса Земли происходит за счет наращивания массы мантии, при этом масса Земли остается постоянной. Одновременно с ростом массы мантии, в едином процессе, происходит наращивание массы океанов (M на рис 5-б).

Покажем, что геологические данные подтверждают квадратичную зависимость увеличения радиуса Земли ($\Delta R \sim t^2$, или $R \sim t^2$). Расширение Земли происходит путем разрастания океанического дна - спрединга, где хорошо известна (рис. 5-в) и многократно подтверждена зависимость глубины астеносферы в зоне спрединга: $h \sim t^{1/2}$, (h – здесь 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: $h \approx 100xt^{1/2}$, для $t < 500$ млн. лет. Таким образом, известная зависимость, показывающая изменение толщины астеносферной зоны от времени эволюции, является (в нашей модели) ни чем иным, как скоростью расширения Земли.

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 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 . 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) $p_o = \rho_o g_o R_o$ должно было быть примерно в 10-15 раз выше чем современное. Воспользуемся оценкой [40]

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. 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 примерно 10 атомов водорода. 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 Земли 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 на них сказаться.

Градиенты 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 известным термодинамическим тождеством: $E = pdV - TdS$. Можно считать, что первое слагаемое правой части “отвечает” за увеличение объема и расширение Земли, второе - за тепловой поток. Положим, что температура T изменяется в области фазового перехода на 10 000 К, а изменение энтропии dS порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина $TdS \approx U$, где U - теплота фазового перехода конденсации, $U \approx 10$ кДж/г. Величина теплового потока в этом случае: $Q = T \cdot dS \cdot M/t_o$, 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.

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.

Краткая информация о модели горячей Земли, приведенная в этом разделе, поможет нам понять, каким образом действие Принципа минимизации гравитационной энергии проявляется в таких актуальных вопросах эволюции Земли как спрединг, субдукция и образование гор.

8. СПРЕДИНГ

Спрединг и субдукция – два механизма взаимосвязанных в тектонике плит. Благодаря спредингу происходит рождение новых плит, которые прекращают свое существование в зонах субдукции. При этом негласно подразумевается, что радиус Земли – суть константа. Внешняя сторона механизма спрединга не вызывает сомнений. Действительно, многократные исследования с помощью подводных аппаратов зон срединно-океанических хребтов, где происходит рождение земной коры, подтверждают сам факт существования спрединга. Имеются ли столь убедительные факты относительно процессов, происходящих в зонах субдукции. Прямых доказательств существования субдукции нет. В выделяемых геологами регионах, называемых зонами субдукции, происходят процессы, которые можно интерпретировать как скольжение плиты вглубь, под материк, под углом примерно 45°. С другой стороны, эти процессы можно интерпретировать и как скольжение плиты вверх, из под материка, тем более что данные по GPS не-

однозначны (рис. 2, 3). Заметим, что зоны субдукции находят не только в океане, например, к ним относят Карпаты, Гималаи и Апеннины и т.п. Ни какая физика, ни теория упругости, ни гидродинамика, не могут найти объяснение постулированному в плитной тектонике феномену «ныряния» жесткой плиты в не менее жесткую литосферу на глубину до 700 км. Кроме этого, заметим, что в физике нет ни одного закона, на основе которого можно было бы утверждать тезис о постоянстве радиуса Земли.

Выясним, существуют ли внешние признаки, показывающие, что явление «ныряния» плиты реально существует. Обратимся к палеомагнитным данным, на основе которых базируются основные постулаты плитной тектоники. Выше мы отмечали, что, согласно этим постулатам, в зоне субдукции должна находиться наиболее «старая» часть плиты и, по мере её удаления от зоны погружения, плита должна быть все более «молодой». Однако это правило нарушается в большем числе случаев. По современным данным скорость дрейфа материков в зонах субдукции достигает десяти см в год, а направление их движения подчас совпадает с направлением, следующим из тектоники плит и полученным по данным о полосовых магнитных аномалиях. Если предположить, что этот дрейф связан с растеканием литосферы в период расширения Земли, то возникает законный вопрос, почему в наше время, когда на Земле фиксируется цикл сжатия, направления дрейфа плит в значительном числе случаев совпадают с направлениями спрединга. Ответом на этот вопрос может быть рассмотренный выше механизм современного дрейфа плит по градиенту геоида. Очевидно, что в цикле расширения на Земле в зоне расширения – в океане, высота геоида возрастает, а на материках – уменьшается. Возникшие в цикле расширения расхождения высот геоида затем нивелируются растеканием литосферы в цикле сжатия. Эта простая идея показывает, что направление течения литосферы, несмотря на то, что причины, вызывающие эти течения различаются, имеют одно и то же направление, как в цикле расширения, так и в цикле сжатия.

Анализируя особенности полосовых магнитных аномалий, представленных на картах осей палеомагнитных аномалий мирового океана [7] и плитной тектоники района Тихого океана [42], можно выделить (см. рис.6) два типа спрединга: «тихоокеанический» и «атлантический» [10]. Исследуя характер раздвижения материков, можно выявить две основные особенности этого процесса. Первая состоит в том, что по мере приближения из прошлого к настоящему, скорость увеличения площади поверхности океанического дна постоянно возрастает. Грубые оценки показывают, что разрастание океанического дна примерно пропорционально t^2 , где t - время эволюции Земли. Вторая особенность заключается в заметном различии характера раздвижения, вернее, характера наращивания океанической коры. Легко выделяются два различающихся процесса (и, очевидно, механизма) образования океанической коры. К первому, наиболее широко обсуждаемому, отнесём, так называемый, «атлантический» тип. Суть его состоит в том, что после раскола праматерика, в зоне раскола стал действовать механизм спрединга, т.е. в зоне срединно-океанического хребта возникла астеносферная зона, с толщиной h убывающей с расстоянием от срединно-океанического хребта как: $h \sim t^{1/2}$. Наращивание океанической коры в зоне срединно-океанического хребта (СОХ) сопровождалось постепенным отодвиганием материков друг от друга. В образованной океанической коре атлантического типа можно выделить: инверсии и соответствующие им полосовые магнитные аномалии последних 80 млн. лет; зону мелового суперхрона (80-120 млн. лет назад); затем зону мезозойских инверсий (120 - 160) и, наконец, зону спокойного поля юрского суперхрона (см. рис 6-а).

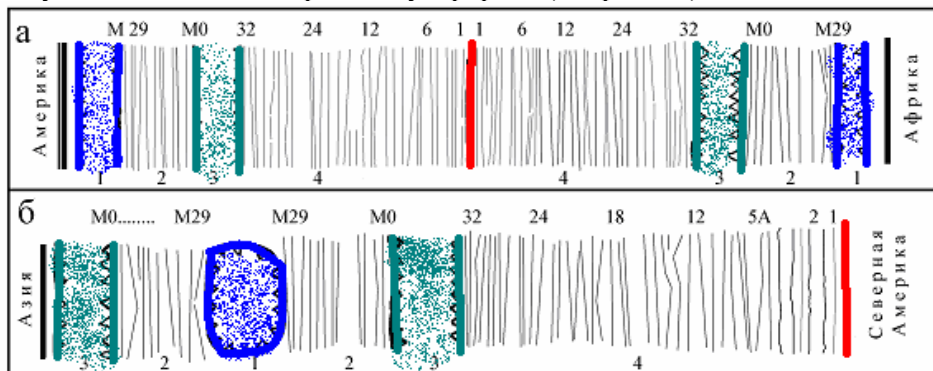


Рис. 6. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океанов (б) по данным полосовых магнитных аномалий. Зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 – «современных» магнитных аномалий.

Совсем иначе наращивалась океаническая кора в западной части Тихого океана. Здесь реализовывался т.н. «тихоокеанический» тип увеличения площади океанической коры. Его суть, в отличие от атлантического, заключается в том, что первоначально между материками: Австралией, Азией и Южной Америкой образовалась разрастающаяся зона, соответствующая, по времени, юрскому суперхрону. При этом раскола материка, как в первом случае, не произошло, образовалась своеобразная кольцевая зона, типа трубы. Вдоль стенок этой «трубы» происходило наращивание океанической коры. Сама «труба» при этом увеличивалась в диаметре. Стенки «трубы» представляли собой глубоководные желоба. Это те самые зоны, которые принято называть зонами субдукции. Затем, вокруг зоны юрского Тихоокеанического поднятия, между ней и материками возникла область расширения, отмеченная наличием полосовых мезозойских инверсий. Возникновение и расширение этой зоны отодвинуло стенку «трубы» (т.е. область зоны субдукции) от границы Тихоокеанического поднятия. Далее следует зона расширения, соответствующая меловому суперхрону и, наконец, - зона инверсий «последних» 80 млн. лет (см. рис 6-б). По-видимому, спрединг в восточной части Тихого океана представлял собой расширяющуюся «трубу», формирование которой и раздвижение материков: Австралии, Азии и Южной Америки затем прекратилось и около 40 - 50 млн. лет тому назад в Тихом океане образовался и начал функционировать срединно-океанический хребет (СОХ), подобный Атлантическому. Рис.7 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация для рис.7-1 (см. рис.4-с) соответствует началу расширения Земли, интенсивному росту мантии, разрастанию океанов и образованию юрской зоны «свободного поля» (ориентировочно 200 млн. лет тому назад). Второй этап (рис.7-2) эволюции Земли, связанный с её расширением, следующий после юрского, отмечен мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий (рис.7-3) – спредингом в период мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний этап (рис.7-4) характеризует современную геодинамическую ситуацию. Спрединг в восточной части Тихого океана в течение юрского, мезозойского и мелового периодов представлял собой расширяющуюся «трубу», стенки которой «не отрывались» от материков, и действие которой постепенно прекращалось со временем эволюции. Окончание этого типа спрединга приходится на точку в Тихом океане, граничащую с Австралией. Спрединг постепенно затухал, «перемещаясь» от этой точки по часовой стрелке примерно до современного Ванкувера, где около 40 - 50 млн. лет тому назад начал функционировать срединно-океанический хребет (СОХ), подобный Атлантическому. Можно видеть, что Тихий океан раскрывался, формируя зону субдукции в виде своеобразной спирали Архимеда, чем-то напоминающей раковину улитки. Зона юрского суперплюма, это известное Тихоокеаническое поднятие, которое по нашей модели является «центром» расширения Тихого океана, практически совпадает с максимальной на Земле высотой геоида. Второе поднятие геоида соответствует центральной части Атлантического СОХ.

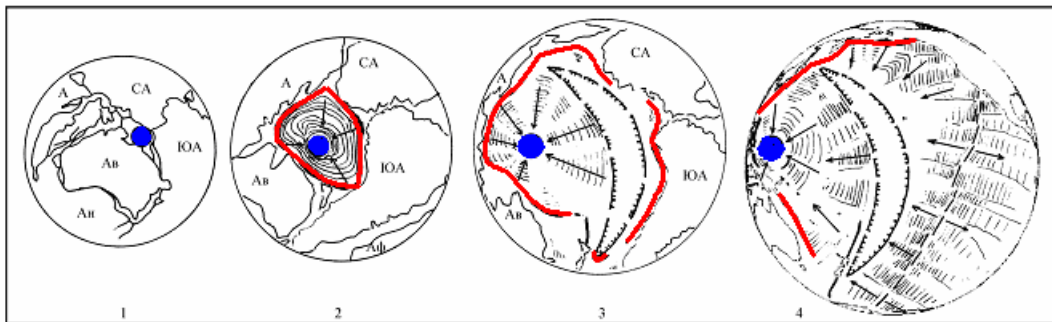


Рис. 7. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Синий круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловой суперплюм; красная линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

Обратим внимание на характер спрединга, связывающий глубину астеносферной зоны h и время t : принято считать, что h (км) $\approx 10 t^{1/2}$ (млн. лет). Сравним её с полученным в [1] графиком для Земли в целом: $h \approx 100 t^{1/2}$. Аналогичную зависимость можно построить, например, для астеносферы в районе Байкала, где: $h = 1.8 t^{1/2}$ для коры и верхней мантии и $h = 5.6 t^{1/2}$ для нижней мантии. Общность этих зависимостей лишней раз убеждает нас в том, что Земля последние

300 – 500 млн. лет расширялась посредством реализации спрединга, когда: $R \sim t^2$ или: $h \sim t^{1/2}$, что одно и то же. Различные коэффициенты перед $t^{1/2}$ показывают долю каждого “участника” в этом процессе. Общим моментом для всех данных по спредингу является строгий порядок полюсовых магнитных аномалий. Причина такого равномерного растекания литосферы по поверхности Земли определяется действием Принципа минимизации гравитационной энергии, иначе образование океанической коры в зонах спрединга не было бы столь упорядоченным.

9. ГЕОДИНАМИКА ЗОН СУБДУКЦИИ

В последние годы, в область космической геодезии, в дополнение к системам лазерной локализации спутников (LAGEOS) и дальноточной радиоинтерферометрии (РСДБ), пришла спутниковая навигационная система GPS (Global Positioning System). Полученные с её помощью результаты по высокоточному определению орбит спутников, относительных координат наземных пунктов и величин деформаций земной поверхности, позволили значительно продвинуться в части понимания геодинамической обстановки на Земле. Эта система показала в ряде случаев, что тектонические модели не соответствуют реально действующим современным деформациям земной коры. Главным образом, это границы плит и зоны т.н. субдукции. Северо-запад Тихого океана является одним из наиболее хорошо изученных районов и, несомненно, районом, наиболее характерным для зоны субдукции. Рассмотрим комплекс явлений составляющих субдукцию на примере этого региона.

Выше мы обсуждали некоторые результаты, касающиеся особенностей строения зон субдукции приведенных на рис. 3. Интересные результаты по структуре зон субдукции, в частности, по их топографии и гравиметрическим профилям поперек зон, а также по классификации зон субдукции, представлены в работе Narabaglia и Doglioni [9]. Зоны субдукции разбиты авторами на два класса, в зависимости от направления дрейфа погружающейся плиты: западный (W-class) и восточный (E-class). Средняя длина изучаемого профиля составляет 1250 км, гравитационные аномалии редуцированы по Фаю, максимальная величина аномалий не превышает 200 мГал. На рис. 8-а жирной линией изображен типичный усредненный топографический профиль зоны субдукции, тонкими линиями - различные варианты профилей зон, не имеющие принципиального различия со средним. Ниже, на рис. 8-б представлено изменение силы тяжести вдоль профиля зоны. Отметим, что во всех 20-ти зонах субдукции, о которых идет речь в этой статье, их параметры практически идентичны и отличаются друг от друга в весьма незначительных (на наш взгляд) деталях.

Толщину слоя z , возмущающего величину g , оценим по известной формуле:

$$\Delta g = 2\pi Gz\Delta\rho. \quad (31)$$

Возмущение силы тяжести в зоне субдукции порядка 50 -100 мГал (см. рис. 8-б), изменение плотности принято считать в таких оценках, порядка 0.2 г/см^3 , толщина возмущающего слоя оказывается: $z \approx 20 - 40 \text{ км}$. Эта оценка показывает, что гравитационные аномалии зон субдукции определяются поверхностной, коровой неоднородностью, а совсем не глубинной, мантийной, как должно бы следовать из плитной тектоники. Из наших оценок получается, что толщина слоя растекания одного порядка с толщиной слоя, возмущающего силу тяжести. (Очевидно, что к подобным оценкам надо относиться как к ориентировочным, тем не менее, они показывают соотношение эффектов, которые определяют физику явлений).

В зонах субдукции, расположенных по окраине Тихого океана сосредоточена основная часть землетрясений и вулканизма Земли. И землетрясения, и вулканы располагаются в зонах субдукции по глубине и латерали неравномерно. Из карты [6] следует, что землетрясения и вулканы по их расположению можно разбить на три диапазона. Отнесём к первому (I) землетрясения с глубиной гипоцентра $h \sim 0 - 70 \text{ км}$, которые находятся на расстоянии $L \sim 0 - 100 \text{ км}$ от «оси» субдукции. Во втором (II) диапазоне, - соответственно, $h \sim 70 - 300 \text{ км}$ и $L \sim 100 - 150 \text{ км}$; и в III-ем: $h \sim 300 - 700 \text{ км}$ и $L \sim 500 - 700 \text{ км}$ (вставка рис. 8). Вулканы, в отличие от землетрясений, которые занимают все три диапазона, располагаются только во II-ом интервале значений. Легко видеть, что угол, под которым опускается источник землетрясений и вулканов, при перемещении от океана к материке, примерно равен 45° .

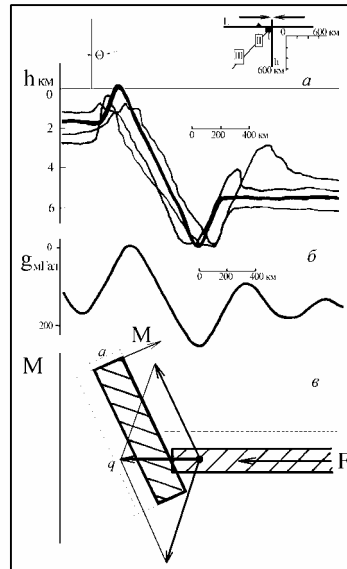


Рис. 8. Субдукция: а – рельеф [9]; б - гравитационные аномалии [28]; в – механическая модель. Вверху справа: схема субдукции и три области сейсмичности и вулканизма.

Рассмотрим, в рамках модели горячей Земли, что же может привести к появлению вдоль берегов Тихого океана глубокого разрыва, т.е. нарушения сплошности литосферы, глубиной, достигающей 700 км. Известно, что разрыв не вертикальный, - он имеет наклон примерно 45° под континент. Эта проблема уже обсуждалась нами выше, где предполагалось, что наблюдаемые на Земле разрывы литосферы, - это «следы» спрединга, который существовал в течение 55 млн. лет (215-160) в период юрского суперхрона. Разовьем эту идею, а так же попытаемся найти факты, её подтверждающие. Зона «спокойного поля» юрского суперхрона по разным картам и статьям, по площади немного больше, чем Австралия. Внешней границей зоны юрского суперхрона можно считать положение магнитной аномалии М29. Оценки показывают, что площадь зоны примерно 10 млн. кв. км. Периметр зоны спокойного поля, с учетом того, что береговая линия зоны, как и все другие береговые линии Земли, представляет собой фрактал, и поэтому реально периметр несколько больше, чем периметр равной по площади простой геометрической фигуры. Исходя из сказанного, принимаем периметр зоны «спокойного поля» равным примерно 15 – 20 тыс. км.

Оценим длину линии зоны субдукции на Тихом океане. Периметр Тихого океана, так же как периметр зоны суперхрона представляет собой фрактал, его длина не менее 40 тыс. км. Длина внутреннего кольца зоны субдукции составляет примерно половину периметра Тихого океана, т.е. ≈ 20 тыс. км. что равно периметру зоны юрского суперхрона. По всей видимости, это совпадение не случайно, оно свидетельствует в пользу нашей модели образования на Земле примерно 200 млн. лет тому назад глубоких разломов, называемых субдукцией. Почему же угол наклона разрыва в области субдукции равен примерно 45° . Предположим, что 160 - 200 млн. лет тому назад, когда шел процесс образования зон, называемых субдукцией, скорость расширения, раздвижения материков была того же порядка, что и сейчас ($v \approx 1$ см/год). Предположим, что и закон увеличения глубины h (км) астеносферной зоны с удалением плиты от оси океанического хребта так же соответствовал современному: $h \approx 100 (t)^{1/2}$, здесь t - время в млн. лет. Подставляя длительность суперхрона $t \approx 50$ млн. лет, получаем глубину зоны $h \approx 500 - 700$ км, как и обнаружено на практически всех зонах субдукции. Горизонтальная протяженность зоны субдукции L определяется скоростью расширения и длительностью суперхрона ($L = vt$), что составляет $L \approx 500 - 700$ км. Отсюда угол наклона разрыва в зоне субдукции действительно близок к 45° .

Растекание поверхностного слоя земной коры, регистрируемое современными измерительными средствами как дрейф плит, по-видимому, определяет физику процессов, происходящих в зоне субдукции. Использование капиллярной аналогии, о которой шла речь выше, позволяет оценить порядок лапласовых, поверхностных сил, приводящих к растеканию литосферы. Величина $\Delta p = 2\alpha/X$. Для того чтобы величина этого давления была порядка текучести литосферы (\approx

1 кбар), при величине α , полученной ранее, кривизна растекающейся литосферы должна быть: $X \approx 10^{10}$ см, что в 20 раз больше земного радиуса и, по-видимому, вполне реализуемо на практике. Таким образом, наши оценки показывают, что зона субдукции, с точки зрения модели растекания, представляет собой область краевых эффектов, возникающих за счет проявления капиллярных сил. Как известно, растекание капли вызывает появление капиллярных волн при условии: $k \geq 1/a$, где k - волновое число, а частота капиллярных волн $\omega^2 = (\alpha/\rho) k^3$ [29]. Как следует из рис. 8-а, высота подъема h , характерный размер явления a и величина краевого угла Θ , соответственно: $h \approx 6 - 8$ км, $\Theta \approx 85 - 87^\circ$, $a \approx 500 - 1000$ км [9].

Рассмотрим картину взаимодействия капиллярных волн в литосфере, приводящих к их интерференции при отражении от преграды в виде желоба и сравним с результатами, полученными при рассмотрении волновой картины, возникающей при образовании гор. Как мы отмечали, в случае образования гор параметры литосферы: h , Θ , a , α принимают более высокие значения, чем в случае субдукции. Капиллярные волны, образовавшиеся в зонах субдукции по всей видимости имеют ту же природу, что и череда горных районов, таких как Тибет, Тянь-Шань и Алтай. Ситуация с поверхностным лапласовым давлением аналогична в обоих случаях. Только в первом случае, при образовании гор - высота геоида возрастает, а во втором случае, возникновения «складок» в зоне субдукции - высота геоида убывает. По всей видимости, идея, высказанная Масловым в [28] относительно возникновения в зоне субдукции интерференционной картины имеет одну и ту же физику, что и периодический характер при образовании гор. Суть явления состоит в том, что возникающее сдвиговое, лапласово давление приводит верхний слой литосферы в движение. Вязкость литосферы зависит от величины скорости дрейфа. В рамках нелинейной механики это явление приводит к появлению регулярной структуры, в особых точках, в которых, кроме векторов горизонтального массопереноса, возникают силы, приводящие к вертикальному переносу массы: т.е. образованию гор и впадин.

Действие принципа минимизации гравитационной энергии в зонах субдукции реализуется как в виде возникновения горизонтальных сдвиговых, так и в виде вертикальных перемещений. В последнем случае, так же как и в случае возникновения гор, могут возникать периодические складки океанической коры и гравитационные аномалии. Геодинамическая картина в зоне субдукции напоминает интерференционную картину, образующуюся при взаимодействии гидродинамических, медленных волн, возникающих в растекающейся литосфере. Причиной возникновения таких волн (автоволн) в медленном ламинарном потоке могут быть эффекты, связанные с неравномерным распределением скорости течения вдоль по плите, которые могут сказаться при взаимодействии потока со «стенкой». По мере приближения к ней, скорость потока уменьшается, и поток как бы разворачивается таким образом, чтобы «встретить» стенку своим фронтом. Именно в этом случае могут возникать отраженные волны и интерференционные эффекты, о которых писал Маслов, и которые «зафиксированы» в виде гряд гравитационных аномалий, параллельных желобам (рис. 3).

Можно попытаться найти другой механизм, объясняющий характер гравитационных аномалий в зонах субдукции. Для этого рассмотрим явления, происходящие в этих зонах, с другой позиции, не в рамках нелинейной механики или гидродинамики, как раньше, а с позиции теории прочности, упругости и изгибных моментов. «Растекающуюся» литосферу будем теперь отождествлять с нагруженной балкой, левый конец которой был приподнят внешними силами на высоту h (см. рис 8-в). К торцу «балки» приложена внешняя сила F , которая, собственно, и вызывает поднятие. В жесткой «балке» в этих условиях возникает изгибный момент M (направленный по часовой стрелке), который будет стремиться опустить правый конец «балки» ниже уровня её равновесия. Обозначим длину «рычага» q , а поперечный размер балки - a . Тогда величина изгибного момента:

$$M = 1/2 gq^2 h a \rho. \quad (32)$$

Напряжение, вызываемое наклоном «балки» в области её правого конца, можно оценить по формуле Навье: $\sigma = M/W$, где W - момент сопротивления (примерно равен объему освобожденному «балкой»), $W = 1/2 q h a$. Величина $\sigma \approx q g \rho$. Если принять длину «рычага» равной примерно 200 - 400 км, то напряжение σ оказывается весьма большим (до 100 кбар). Оно значительно превышает величину литостатического давления и прочности горных пород, что, по-видимому, можно расценить как подтверждение правомерности нашего подхода. Форма балки может быть описана уравнением: $w(x) = h \cos(\pi x/\lambda)$, тогда на изгиб балки влияют изгибающий мо-

мент M и изгибающий момент от действия осевой нагрузки S , дифференциальное уравнение изогнутой оси балки (упругой линии) при изгибе балки описывается формулой:

$$d^2w(x)/dx^2 = M(x)/EJ - Sw(x)/EJ, \quad (33)$$

где E - модуль Юнга, J - момент инерции балки. Решение этого уравнения имеет синусоидальный, волновой характер, который, возможно, так же как интерференция акустических, капиллярных или гидродинамических волн, или возникновение периодических структур в задаче с ползуном на механическом ремне, соответствует наблюдаемой картине гравитационных аномалий зон субдукции.

Обсуждая проблему процессов, происходящих в зонах субдукции, мы остановились на трех возможных механизмах. Реально присутствует только один некий геологический механизм, вызывающий сумму явлений, характерных для этих зон. Как часто бывает в физике, одно и то же сложное явление можно объяснить в рамках её различных разделов. В такой ситуации, если цель этого достойна, создается боковое ответвление физики, в которой устанавливаются специфические законы. Так возникли, например, биофизика или химическая физика. Так возникла и геофизика, или, иначе, физика Земли. Решение обсуждаемой нами проблемы было найдено в рамках т.н. плитной тектоники, в которой плита «ныряла» под материк, участвуя в общей глобальной конвекции. Плитная концепция находила объяснение многим явлениям, происходящим на Земле, но оказалась ошибочной. На смену ей должна прийти другая идея, возможно, это будет концепция горячей, расширяющейся Земли. Новая концепция должна найти непротиворечивое объяснение всем (по возможности) известным экспериментальным фактам, имеющим отношение к Земле. Должен найти объяснение и обсуждаемый нами факт, касающийся того, что Земля, как другие планеты и большие спутники, - принимает форму шара. Возможно, окажется так, что предлагаемый к обсуждению Принцип будет наиболее адекватен известным данным, возможно, будет найдено другое, более адекватное объяснение. Это покажет время. Все ли тектонические параметры Земли подвержены действию Принципа? Наиболее интересный ответ на этот вопрос дает анализ такого параметра, как высота гор.

10. ВЫСОТА ГОР

Наличие гор на Земле, казалось бы, должно находиться в противоречии с Принципом. Выше мы отмечали, что отношение максимальной высоты гор к радиусу Земли H/R существенно больше, чем отношение высоты геоида к радиусу. Следовательно, на Земле происходит минимизация высоты геоида, а не высоты гор. Таким образом, для гор Принцип «открывает возможность» увеличивать свою высоту. Более того, как следует из наших обсуждений, действие Принципа приводит к их возникновению и росту. Надо сказать, что высота горы – величина не случайная, она может быть оценена из соотношения: $\rho g H = \sigma$, где σ - предел текучести материала литосферы (в терминах самоорганизации – перколяционный порог). Примем эту величину равной примерно 3 кбар, тогда максимальная высота гор $H \approx 10$ км, что чуть больше, чем высота самых высоких гор на Земле (> 8 км). Как известно, на Марсе высота гор выше: $H \approx 25$ км, т.е. примерно в 3 раза больше чем на Земле, но ведь и сила тяжести на Марсе $g = 360 \text{ см/с}^2$ – примерно в три раза ниже земной. Более того, принято считать, что на Земле раньше высоких гор не было. Если принять, что в течение эволюции масса Земли не меняется, а радиус растет, то и сила тяжести – падает. Так что здесь противоречий нет.

Принято считать, что горы образуются в результате натекания поверхностного слоя литосферы на преграду (в плитной тектонике – из-за столкновения плит). Наиболее распространенный пример, это «течение» к северу Индостана и столкновение этого потока с Азиатским материком в районе Гималаев. Надо сказать, что образование горы идет не только вверх, но и вниз, что связано с известным явлением изостазии, которое приводит, в конечном счете, к образованию «корней» гор. Существование явления изостазии лишней раз указывает на то, что, рассматривая образование гор, можно пользоваться гидродинамической моделью. Возможно, современная геодинамика в значительной мере определяется действием на земной поверхности Принципа минимизации гравитационного потенциала, который приводит к минимизации высоты геоида, не обращая, при этом, «внимания» на высоту гор. Возможно так же, что течение литосферы, и связанные с этим явлениями вулканизм, землетрясения и образование гор, составляют сумму процессов, обязанных протеканию процессов самоорганизации. Возможно, по сути, что это одни и те же процессы, цель которых привести такую «систему» как Земля в состояние

с меньшей энтропией. В случае самоорганизации, высота гор, так же как энергия землетрясения или мощность вулканического извержения - фракталы. Фрактальные среды проявляют свои свойства, выражающиеся в том, что сильных событий бывает мало, более слабых, - больше, ещё более слабых, - ещё больше, и т.д. Степень фрактальности процесса или явления оценивается по величине Хаусдорфовой размерности (22) D_H . Однако прежде чем оценивать D_H следует убедиться в том, что в логарифмическом масштабе наблюдается линейная зависимость между количеством событий $N(r)$ и амплитудой события r .

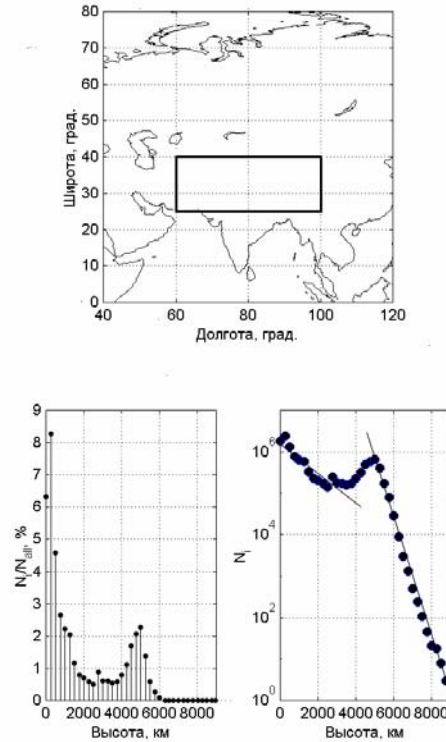


Рис. 9. Высота гор. Вверху – исследуемый регион. Слева внизу – гистограмма $N-H$. Справа внизу зависимость $\lg N - \lg H$ (N – число гор, H – их высота).

Интересно выяснить, является ли высота гор фракталом. Для анализа был выбран горный район, включающий Гималаи, ограниченный: по широте: $40^\circ - 25^\circ\text{N}$, и по долготе: $60^\circ - 100^\circ\text{E}$ (см. рис. 9). Использовалась глобальная цифровая база данных о топографии GTOPO30 геологической службы США (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30>) с пространственным разрешением 30 угловых секунд (около 1 км). Общее количество точек 8841600, максимальное значение высоты гор 8752 м. Ширина классового интервала по высоте при вычислении распределения 250 м. (рис.9 внизу слева). На рис.9 внизу справа приведено распределение средних значений высот в ячейках 1×1 км. Можно выделить две наклонных прямых, одна из них характерна для невысоких гор, другая – для более высоких гор. Очевидно, что в исследуемый регион либо «попали» два различных горных района, либо это один район, но он «пережил» два различных этапа горообразования. Величина Хаусдорфовой размерности для исследуемого горного региона равна: для невысоких гор (пологая часть графика) $D_H \approx -0.27$, для высоких гор (крутая часть графика) $D_H \approx -0.9$.

Не будем делать ни предположений, ни выводов относительно особенностей образования гор в выбранном регионе. Приведенный пример носит только методический характер. Возможно, оценка D_H может оказаться полезной для выяснения физики процессов образования гор и их классификации. Важный вывод, который можно сделать, анализируя рис. 9, состоит в том, что высота гор, это фрактал, а это означает: наличие гор, их количество и высота не случайны, а собственно образование гор является следствием протекания процессов самоорганизации, происходящих на поверхности Земли. Как отмечалось выше, образование гор является так же следствием действия Принципа.

Обратим внимание на то, что высота гор оценивалась из соотношения: $\rho g H \sim \sigma$, (I) где σ - предел текучести материала литосферы. Формулу для высоты гор можно получить из соотношения: $\rho g H^2 \sim \alpha$ (II), (т.к. $H = a(1 - \sin\theta)^{1/2}$ и $a^2 = \alpha/\rho g$, α - поверхностное натяжение). Сравнивая I и II, получаем: $H = \sigma a^2/\alpha$: высота гор пропорциональна пределу текучести и квадрату капиллярной постоянной и обратно пропорциональна величине поверхностного натяжения (лапласовой силе). Последнее, казалось бы, противоречит (II), однако это не так, потому, что после подстановки значения a , получаем: $H = \alpha(1 - \sin\theta)/\sigma$. Отсюда следует реологический вывод: поверхностное натяжение и сдвиговое лапласово напряжение тем выше, чем выше предел текучести. Оценив выше: $\alpha = 10^{19}$ дин/см; $\sigma = 10^9$ дин/см²; $a = 10^8$ см и $H = 10^6$ см, можно получить величину $(1 - \sin\theta) = 10^{-4}$, или $\theta \rightarrow 90^\circ$, что соответствует: $a \gg H$.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги обсуждения роли Принципа минимизации гравитационной энергии, проявляющегося в различных аспектах физики Земли. Выделим несколько наиболее важных моментов.

Земля стремится принять форму сфероида со степенью сжатия 1/298 и при этом минимизировать величину расхождения между сфероидом и реальным геоидом. Степень сжатия «жидкого» сфероида, вращающегося с периодом 24 часа, должна быть 1/232. Анализ сжатия Земли показывает, что она негидростатична. Следствием этого вывода является отсутствие на Земле глобальной конвекции в мантии. Интегральная жесткость мантии, близкая к жесткости стали, не позволяет существование на Земле глобальной конвекции. В пользу этого вывода говорят ещё ряд фактов, таких как: отсутствие непрерывного слоя астеносферы, слишком малая величина гравитационных аномалий, особенности характера изменения скорости сейсмических волн в мантии и т.п. Гидростатическое равновесие наблюдается только в тонком поверхностном слое Земли. Это означает, что должен существовать некий закон, принцип или механизм, который является причиной, по которой происходит перераспределение массы верхней оболочки Земли таким образом, чтобы высота геоида стала равной нулю. В качестве такого закона предлагается Принцип минимизации гравитационной энергии Земли.

Принять форму шара стремится капля жидкости вне посторонних сил. Формальная аналогия между каплей и сферической Землей позволяет ввести новое понятие в физике Земли – поверхностное натяжение литосферы и оценить его величину, а так же величину сдвигового, лапласового напряжения, которое оказывается достаточным для того, чтобы привести в движение поверхностный слой земной коры и литосферы, что и наблюдается в виде дрейфа материков. В соответствии с Принципом, дрейф материков происходит вдоль градиента геоида в область его минимальной (по модулю) высоты.

«Поверхностное натяжение литосферы» приводит к дрейфу материков (сдвиговому течению поверхностного слоя литосферы) только в том случае, когда в объеме Земли возникнет дальний порядок, и реализуются фазовые переходы первого рода. В этом случае Земля представляет собой динамическую систему, в которой происходит регулярное изменение объема, при общей тенденции к его увеличению. Масса Земли остается постоянной, а сама Земля при этом циклически расширяется.

Реализация принципа минимизации гравитационной энергии, при постоянстве массы и момента инерции планеты, превращает однородную Землю в многослойную. При этом её объем увеличивается.

Сделаем несколько сопутствующих выводов и приведем замечания, следующие из модели горячей Земли:

- В модели горячей Земли обосновывается скорость увеличения радиуса Земли: $R \sim t^2$. Согласно данным по толщине астеносферы h в зоне срединно-океанических хребтов: $h \sim t^{1/2}$. Так эти зависимости идентичны, можно считать, что зависимость: $h \sim t^{1/2}$ подтверждает следующее из модели: $R \sim t^2$.

- Связь между ядром и поверхностью Земли при отсутствии глобальной конвекции в мантии реализуется посредством процессов теплопереноса в рифтовых, астеносферных зонах, подобных глобальной структуре Байкальского рифта, пронизывающего всю мантию от ядра до земной поверхности.

- Структура полосовых магнитных аномалий различается в Тихом и Атлантическом океанах. Анализ структуры аномалий обоих океанов не подтверждает постулаты плитной тектоники.
- На основе модели горячей Земли и Принципа минимизации гравитационной энергии предложена принципиально другая феноменологическая модель субдукции.
- Следствием того, что спрединг на Земле существует, а глобальной конвекции и субдукции нет, является то, что Земля расширяется. В настоящее время инструментально фиксируется не расширение, а сжатие Земли. Это говорит о возможной смене циклов сжатия и расширения.
- Периодическая смена режимов расширения и сжатия определяет пульсирующий характер эволюции Земли, о котором неоднократно упоминали ведущие геологи, такие как В. Бухер, М.М. Тетяев, М.А. Усов, В.А. Обручев, и др.
- В цикле расширения силы, приводящие к перемещению материков в горизонтальной плоскости больше, чем силы «поверхностного натяжения», однако, согласно Принципу, направления дрейфа литосферных плит остаются неизменными в циклах расширения и сжатия Земли.
- Высоту гор любого горного района Земли можно рассматривать как индикатор степени самоорганизации этого региона. Более низкая величина фрактальной Хаусдорфовой размерности характеризует более древний регион. Оценивая фрактальную размерность для различных горных районов Земли, можно выявить однотипные структуры.
- Принцип минимизации гравитационной энергии приводит к минимизации высоты геоида. Действительно, если сравнить высоту гор Земли H с её радиусом R , то окажется, что эта величина порядка 10^{-3} . Сравнивая величины гравитационных аномалий с силой тяжести $\Delta g/g$, убеждаемся, что эта величина на порядок меньше (10^{-4}), в то время как отношение высоты геоида к радиусу Земли $H/R \approx 10^{-5}$. Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать не высоту рельефа, не величину гравитационных аномалий, а высоту геоида.
- На Земле происходят процессы самоорганизации, приводящие к минимизации её гравитационного потенциала. Например, в качестве одного из исполнительных механизмов самоорганизации можно считать землетрясения, которые перераспределяют энергию между вращением Земли, упругим полем, гравитационным полем и теплом, и приводят к весьма заметному уменьшению величины гравитационной энергии Земли.
- Наблюдаемая пространственная корреляция формы геоида, особенностей строения мантии и внутреннего ядра Земли показывает, что существует радиальная связь между геооболочками.

Все сказанное позволяет считать, что *принцип минимизации гравитационной энергии является одним из фундаментальных свойств, определяющих образование и эволюцию Земли, планеты и больших спутников.*

Благодарности. Автор благодарен сотруднику ГС СО РАН С. Ю. Хомутову за помощь в обработке данных по топографии, а также сотрудникам ИВиС ДВО РАН А. В. Викулину и В. А. Широкову - за конструктивные замечания и доброжелательную критику.

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ, 1990. 217 с.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли // УФН. 1997. Т. 167. С. 1001-1012.
- Алексеев А.С., Ваньян Л.Л. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234. С. 790-793.
- Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle // Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Карта осей палеомагнитных аномалий мирового океана / Составители: Карасик А.М. и Сочеванова Н.А. ЛО ИЗМИРАН. Л. 1981.
- Plate- tectonic map of the Circum-Pacific region. Pacific basin sheet. 1985. Chairman M.T.Halbouty. Tulsa. Oklahoma. USA.
- Чудинов Ю.В. Расширение Земли и тектонические явления: о направлении движений в окраинно-океанических зонах // Геотектоника. 1981. № 1. С. 19-37.
- Tsallis C. Nonextensive statistics: theoretical, experimental and computational evidence and connections // Brazilian Journal of Physics. 1999. V. 29. № 1. P. 1 – 35.

- Harabaglia P., Doglioni C.* Topography and gravity across subduction zones // *Geophys Res. Lett.* 1998. V. 25. № 5. P. 703-706.
- Kuznetsov V.V.* Characteristic features of continental drift // *Modern Geology.* 1990. V. 14. P. 239-243.
- Шен Э.Л.* Расширение Земли в связи с формированием её глобальной структуры. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука, 1984. С.180-185.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 379 с.
- Шен Э.Л.* Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1991. № 2. С. 18-25.
- Mandelbrot B.B.* The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982.
- Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
- Chao B.F., Gross R.S.* Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes // *Geophys. J.R. astr. Soc.* 1987. V. 91. P. 569-596.
- Chao B.F., Gross R.S.* Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 122. P. 776-783.
- Chao B.F., Gross R.S., Dong D-N.* Changes in global gravitational energy induced by earthquakes // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 122. P. 784-789.
- Кобелев Я.Л., Кобелев Л.Я., Романов Е.П.* Фрактальная размерность поверхности как параметр порядка // *ДАН.* 2000. Т. 370. С. 757-759.
- Бердыев А.А., Мухамедов В.А.* Землетрясения - фликкер-шум? // *Докл. АН СССР.* 1987. Т. 297. № 5. С.1077-1080.
- Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 442 с.
- Эвернден Дж.Ф.* О чем говорят параметры фигуры Земли $\epsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? // *Изв. РАН Физика Земли.* 1997. № 2. 1997. С. 85-94.
- Джеффрис Г.* Земля, её происхождение, история и развитие. М. ИЛ, 1960. 485 с.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др.* Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 198 с.
- Lewis Ch., Smith A.D.* The geoid, plate configuration and Antarctica // *Геофизический журнал.* 1998. Т. 20. № 4. С. 3 - 8.
- Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H.* Splitting functions of longperiod normal modes of the Earth // *J. Geophys. Res.* 1988. V.93. № B11. P. 13716-13742.
- Кузнецов В.В.* Земля как термодинамическая система // *Геология и геофизика.* 1998. Т. 39. № 7. С. 987-1007.
- Маслов Л.А.* Изучение динамики крупномасштабных движений литосферы по значениям высот геоида. Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии. Киев: Наукова думка, 1988. С. 193-197.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика М.: Наука, 1986. 736 с.
- Kato T., Kotake Y., Nakao S. et al.* Initial results from WING, the continuous GPS network in western Pacific area // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 3. P. 369-372.
- Imakire T.* Crustal deformation observed by GEONET (<http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html>)
- Adjaout A., Sarrailh M.* A new gravity map, a new marine geoid around Japan and the detection of the Kuroshio current // *J. Geodesy.* 1997. V. 71. P. 725-735.
- Стокер Дж.* Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М.: ИЛ. 1952. 264 с.
- Carey S.W.* The expanding Earth. Amsterdam: Elsevier, 1976. 488 с.
- Кэри У.* В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир, 1991. 447 с.
- Рудич Е.М.* Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра, 1984. 250 с.
- Meservey R.* Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth // *Science.* 1969. V. 166. P. 609-621.
- Горан М.* Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 109 с.
- Vogel K.* Recent crustal movements in the light of Earth expansion theory // 6th International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth". Potsdam. 1989. P. 284-289.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика М.: Наука, 1964. 567 с.

Сведения об авторе:

КУЗНЕЦОВ Владимир Валерьевич – окончил Новосибирский технический университет, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИКИР ДВО РАН. Проводит исследования в области физики Земли (модель горячей Земли, физика землетрясения, климат, природа геомагнетизма).

Россия, 684034, Камчатская обл. с. Паратунка, ул. Мирная, 7, ИКИР.

Тел.: (41531) 33193

E-mail: vvk@ikir.kamchatka.ru