

Проблемы в геодинатике и новый подход к их решению

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.

1. Принцип минимизации гравитационной энергии

Гравитационный потенциал j удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta j = -4\pi Gr. \quad (1)$$

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

$$j = G \int (rdV)/r + C, \quad (2)$$

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

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

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z), \quad (3)$$

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

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z) = T. \quad (4)$$

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

$$\Delta n = N = -\chi / (dj/dn) = \chi/g, \quad (5)$$

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

$$\Delta g = 1/g (dg/dn) \chi - dx/dn. \quad (6)$$

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

Равновесной формой самогравитирующего изотропного тела, обладающего фазовой поверхностью, как известно, является шар. С другой стороны, в соответствии с

принципом Гиббса-Кюри, форма шара присуща жидким изотропным телам в отсутствие внешних полей. В этом случае равновесная форма шара определяется минимумом свободной поверхностной энергии:

$$a \int dS = \min, (V = \text{const}). \quad (7)$$

Здесь a - поверхностное натяжение, S - площадь поверхности раздела фаз, V – объем шара. Приобретение телом шарообразной формы, как в случае самогравитации, так и при проявлении поверхностных эффектов в жидкости, базируются на общем для обоих случаев принципе пространственной корреляции структуры вещества и эффекте возникновения дальнего порядка. Возникновение дальнего порядка (упорядоченной фазы) имеет в физике фундаментальный характер. Как при самогравитации, так и при образовании фазовой поверхности, частицы вещества «чувствуют» не только ближайших к ним соседей, но и весь их «ансамбль». Причиной возникновения дальнего порядка в самогравитирующей структуре может быть, например, континуальное вращение планеты, или, как показано в [Tsallis, 1999], негиббсовская термодинамика самогравитирующих структур.

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

Отсюда получим выражение принципа минимизации гравитационного потенциала:

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

Полученное выше равенство позволяет оценить величину a :

$$a = G M z r/R. \quad (9)$$

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

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

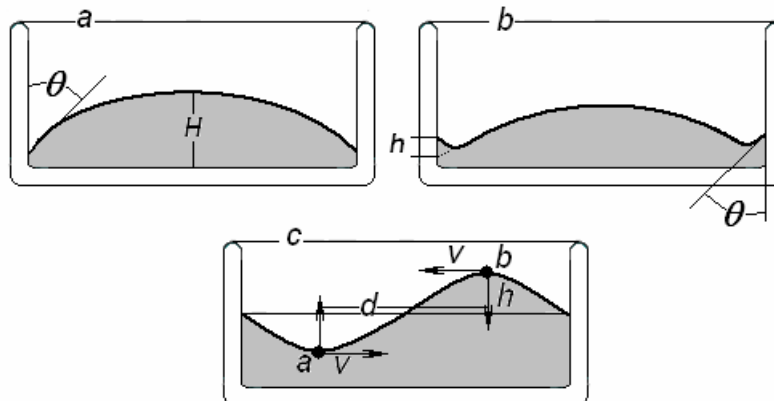


Рис. 1. Растекание капли жидкости на смачиваемой (b) и не смачиваемой (a) поверхности, q – угол смачивания. Выравнивание возмущенного уровня жидкости между точками a и b в зависимости от высоты геоида h , v – скорости горизонтального переноса жидкости и изменения высоты h (c).

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 (рис. 1-а, б). Начальная высота капли H , радиус стакана R ($R \gg H$), поверхностное натяжение жидкости a , капиллярная постоянная $a = (2a/gr)^{1/2}$, g - сила тяжести, r - плотность жидкости. Объем капли $2/3 \times \pi H^3$, объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана $\pi R^2 d$. Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим q , высоту подъема жидкости – h (см. рис. 1-б). 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 : $\Delta p = a(1/X_1 + 1/X_2)$. 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 a можно оценить, если воспользоваться формулой: $a = (2a/gr)^{1/2}$, капиллярную постоянную a можно получить из (10), подставив в неё данные для зоны субдукции, приведенные в [Harabaglia, Doglioni, 1998]. 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: $a \approx 10^{19}$ дин/см. (Для сравнения, a 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 $p(a)$:

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

Это известная формула Лапласа. Отсюда следует условие равновесия поверхности:

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

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 a , ($\approx 10^{19}$ дин/см), то поверхностное, лапласово давление оказывается вполне существенным: $p(a) = 10$ 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», образуемого за счет разности в радиусах эллипсоида вращения и геоида (высоты

геоида N): $p(N) = rgN. = 30$ 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 $p(a)$. Давление такой величины уже не может приводить к растеканию слоя литосферы по поверхности Земли. В свою очередь, давление $p(a)$ 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: $GM/R \geq U_{\text{п}}$, где $U_{\text{п}}$ - теплота плавления вещества планеты ($U_{\text{п}} \approx 1$ 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.

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. Запишем требование минимума функционала, описывающего гравитационную энергию шара, в форме:

$$W = - 2\pi \int_0^R j r r^2 dr, \quad (13)$$

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

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

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

Определим распределение плотности по радиусу гравитирующего шара:

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

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

$$r(r) = r_{\text{max}}(r), \quad 0 \leq r \leq R.$$

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 нуль становится внутренней точкой области допустимых значений вариации $dr(r)$ для каждой точки $r_0 \leq r \leq R$. Решение задачи оказывается разрывным:

$$\begin{aligned} dr(r) &= dr_{\max}(r), & 0 \leq r \leq r_G, \\ dr(r) &= dr(r), & r_G \leq r \leq r_o, \\ dr(r) &= dr_{\min}(r), & r_o \leq r \leq R. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь dr_{\max} , dr , и dr_{\min} - границы области допустимых значений $dr(r)$, а r_o 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. Высота геоида

Построим распределение высот геоида по данным [Lewis, Smith, 1998] и сравним его со структурой внутреннего ядра и мантии, полученной по результатам интерпретации данных по анизотропии сейсмических свойств мантии и внутреннего ядра. На рис. 2 показано сечение свойств Земли по экватору: анизотропии внутреннего ядра (1), анизотропии мантии (2) и высоты геоида (3), и 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, 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, собственно, и происходит его выравнивание. Именно здесь находятся зоны столкновений, коллизии, или, иначе, - зоны субдукции.

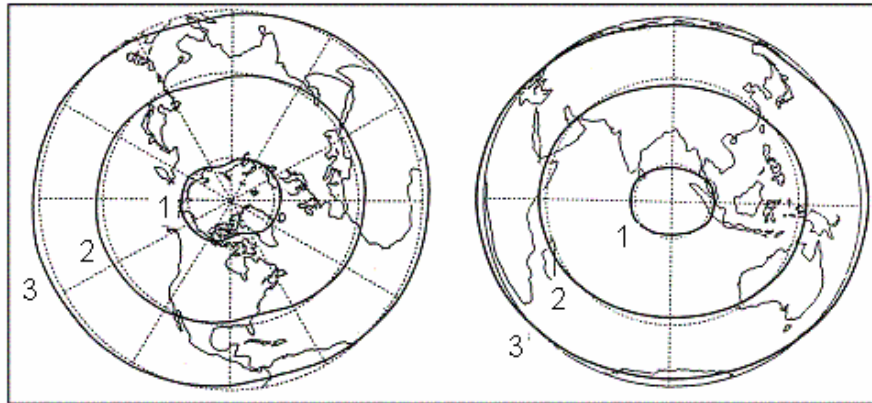


Рис. 2. Высота геоида (3), особенности акустических свойств мантии (2) и внутреннего ядра (1), полученные при анализе *splitting*-функций собственных колебаний для двух поперечных сечений Земли.

Обратим внимание на форму геоида, на которой выделяются 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 выразительный, в области 300° E (в Бразилии). Полюса, как северный, так и южный, попадают в область отрицательных высот геоида. Особенности геоида отражены на рисунке 2, 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).

Метод построения и анализа *splitting*-функций (*split* - расщеплять) расщепления спектров собственных колебаний Земли (СКЗ) состоит в анализе СКЗ, возникающих после сильных землетрясений. 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 видны 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, пространственная структура внутреннего ядра и среднего сечения 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. 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 $\approx 2 \times 10^{-5}$. 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 $dv_p/dR = 1$ км/с / 100 км и величине скорости $v_p \approx 10$ км/с эквивалентно расстоянию $\Delta R = 2$ км или $\approx 3 \times 10^{-4}$. 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.

3. 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 $v \approx 10$ см/год, а скорость убывания высоты геоида $dN(x)/dt \approx 10^{-3}$ мм/год [Маслов, 1988]. Это означает, что собственно “течет” только самый верхний и сравнительно тонкий слой литосферы. Толщину слоя (z) можно оценить, если воспользоваться теорией поверхностных явлений и, конкретно, примером, описывающим течение тонкого слоя жидкости со скоростью $v(z)$ по твердой поверхности, где $v = 0$ ($z = 0$):

$$h v \sim -z(da/dr), \quad (23)$$

где h вязкость вещества слоя литосферы ($h \approx 10^{24}$ Пз), $v \approx 10^{-7}$ см/с, z - толщина слоя, $da/dr \approx 10^{10}$ дин/см² (10 кбар) - изменение поверхностного натяжения вдоль слоя. Отсюда $z \approx 10$ км. Скорость горизонтального течения литосферы [Маслов, 1988] v_x :

$$v_x = rg^2 / (8\pi h G \Delta r z) \times \int_A^B N(x) dx, \quad (24)$$

где r - плотность слоя, Δr - 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.

Соотношение между скоростями дрейфа и изменения высоты геоида можно оценить из самых общих соображений. В качестве модели процесса уменьшения высоты геоида, представим сосуд с жидкостью, уровень которой был возмущен на высоту h (рис. 1-с). По мере того, как уровень выравнивается, точки a и b приближаются друг к другу с горизонтальными скоростями v и опускаются (поднимаются) с вертикальными скоростями. Соотношение между ними примерно равно соотношению между h и d . В нашем случае, высота геоида $h = 100$ м, а расстояние между точками $d = 1$ тыс. км, откуда получаем: $h/d = 10^{-4}$, что по порядку величин совпадает с нашими оценками.

Дрейф Тихоокеанической плиты, обладающий максимально большими скоростями (≥ 10 см/год), имеет направление вдоль градиента геоида [Kato, 1998]. Связь направлений

дрейфа плит с градиентом геоида была выявлена автором раньше, еще по данным лазерной локации спутников и РСДБ [Kuznetsov, 1990]. Определения скоростей дрейфа материков и плит, выполненные с использованием систем GPS, уточнили и подтвердили данные, имеющиеся в нашем распоряжении. Анализируя данные работы [Imakire, 2005] видно, что плиты дрейфуют не в область минимума высоты геоида, а к его нулевой отметке (аттрактору). Так наблюдения, проведенные на китайском пункте Xian и ряде других пунктов, где высота геоида принимает отрицательное значение (репелер), показали, что они перемещаются навстречу Тихоокеанической плите, вдоль градиента геоида (рис. 3).

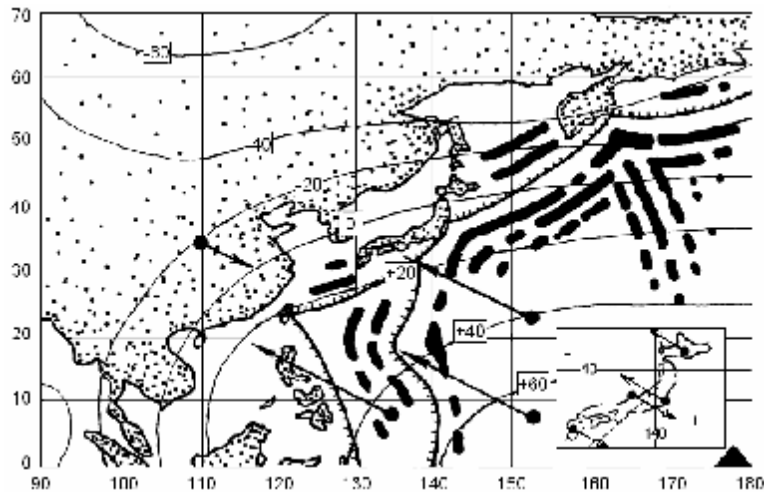


Рис. 3. Карта высот геоида, гравитационных аномалий, направлений и величин дрейфа материков и плит. Черный треугольник внизу справа соответствует максимальному значению высоты геоида. Во вставке (правый нижний угол рисунка) показаны направления скоростей дрейфа литосферы, измеренные в Японии с помощью GPS-системы [Imakire, 2005]. Штриховая линия, это линия геодинамического равновесия (аттрактор). При достижении равновесия встречные скорости дрейфа равны нулю.

На вставке, в правом нижнем углу рисунка 3, приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии [Adjaout, Sarrailh, 1997]. 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 вставке рис. 3. Однако реально положение Японии относительно этой линии не соответствует минимальной высоте геоида [Adjaout, Sarrailh, 1997], 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.

Приведем некоторые оценки вертикальных перемещений плит в области максимальных величин высот геоида. Как показал Маслов [1988], 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.

На геодинамической карте [Plate, 1985] 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. 3). 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. 4-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° N высота геоида начинает немного возрастать и затем понижается до нулевой отметки, которая приходится на северную границу Азиатской плиты (рис. 4-б). Рис. 4-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: $\alpha = (2a/gr)^{1/2}$). Рисунок 4-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. 4-d 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. 4-а и 4-d, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы. Предположим, что кривая, отображенная на рис. 4-d 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 [Стокер, 1952], 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:

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

Следуя книге Дж. Стокера [1952], 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. 4-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 [Стокер, 1952], которое может подойти для описания нашего случая, и соответствовать решению 4-d, можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + F(dx/dt) + kx = 0, \quad (28)$$

где

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

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.

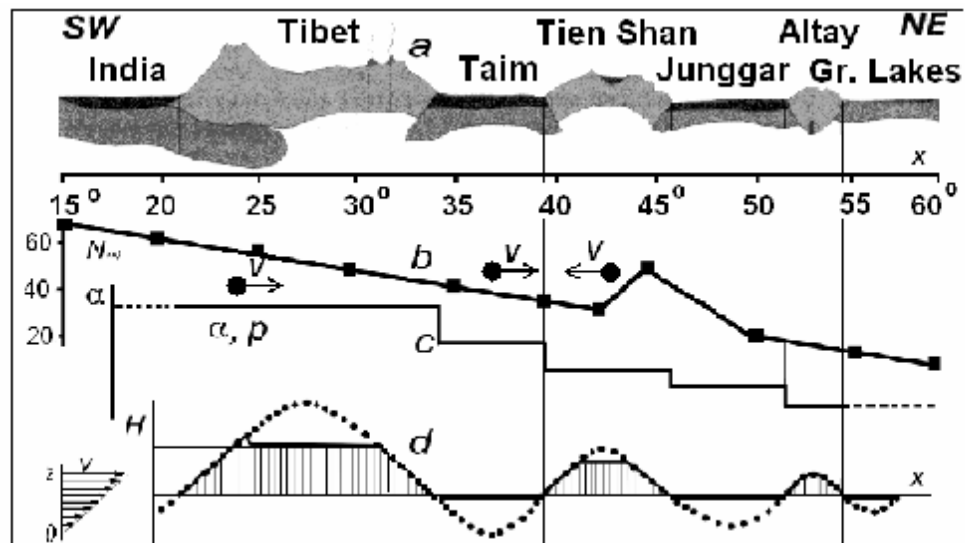


Рис. 4. Схема горных районов центральной Азии (рис. 4-а) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N – в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (4-б) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы a и величины сдвигового (лапласового) давления p вдоль профиля (4-с). Модельные представления (4-д).

4. 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 неоднозначны (рис. 3, 4). Заметим, что зоны субдукции находят не только в океане, например, к ним относят Карпаты, Гималаи и Апеннины и т.п. Никакая 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. Все эти факты требуют пересмотра ряда устоявшихся представлений.

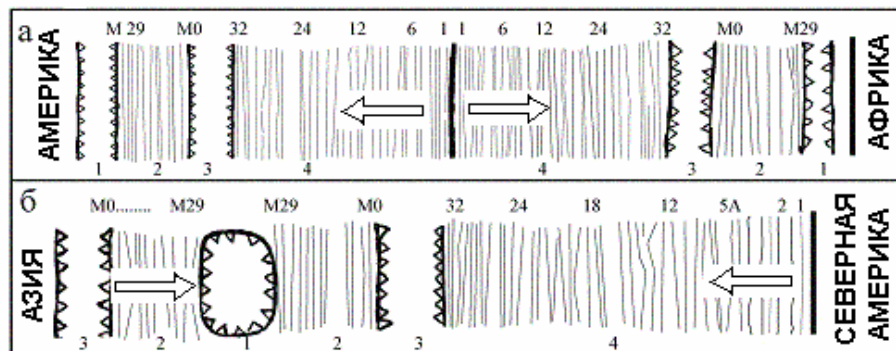


Рис. 5. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океанов (б) по данным полосовых магнитных аномалий. Зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 - «современных» магнитных аномалий.

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, вызывают дрейф в одном и том же направлении, как в цикле расширения, так и в цикле сжатия.

Анализируя особенности полосовых магнитных аномалий, представленных на картах осей палеомагнитных аномалий мирового океана и плитной тектоники района Тихого

океана, можно выделить два типа спрединга: “тихоокеанический” и “атлантический” (рис. 5). 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. 5-а).

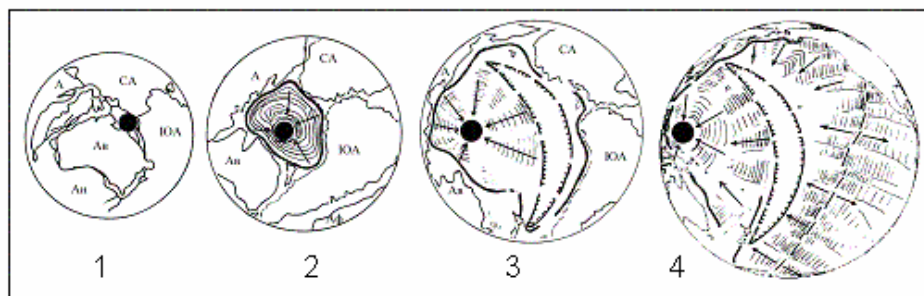


Рис. 6. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Черный круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловый суперплюм; толстая линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

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 типа, 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 в виде 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 5-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. Рисунок 8 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация для рисунка 6-1 соответствует началу расширения Земли, интенсивному росту мантии, разрастанию океанов и образованию юрской зоны “свободного поля” (ориентировочно 200 млн. лет тому назад). Второй этап (рис. 6-2) эволюции Земли, связанный с её расширением и следующий после юрского отмечен мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий этап (рис. 6-3) – спредингом в период мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний этап (рис. 6-4) 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.

Обратим внимание на характер спрединга, связывающий глубину астеносферной зоны h и время t : принято считать, что h (км) $\gg 10 t^{1/2}$ (млн. лет). Сравним её с полученным графиком для Земли в целом: $h \gg 100 t^{1/2}$. 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 полосовых магнитных аномалий. Причина такого равномерного растекания литосферы по поверхности Земли определяется действием Принципа минимизации гравитационной энергии, иначе, - образование океанической коры в зонах сперинга не было бы столь упорядоченным.

5. Геодинамика зон субдукции

В последние годы, в область космической геодезии, в дополнение к системам лазерной локации 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 Harabaglia и Doglioni [1998]. 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. 7-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. 7-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.

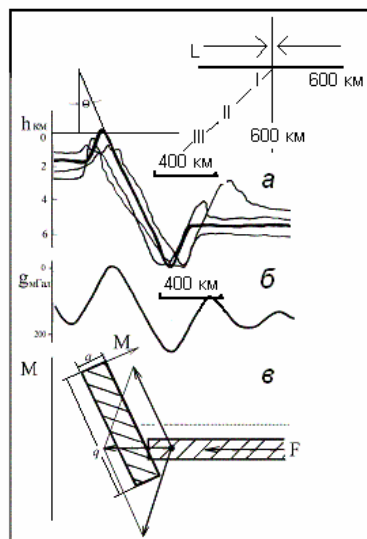


Рис. 7. Субдукция: а – рельеф [Harabaglia, Doglioni, 1998]; б - гравитационные аномалии [Маслов, 1988]; в – механическая модель. Вверху справа: схема субдукции и три области сейсмичности и вулканизма.

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

$$\Delta g = 2\pi G z \Delta \rho \quad (31)$$

Возмущение силы тяжести в зоне субдукции порядка 50 -100 мГал (см. рис. 7-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. Известно, что землетрясения и вулканы по их расположению можно разбить на три диапазона. Отнесём к первому

землетрясения с глубиной гипоцентра $h \sim 0 - 70$ км, которые находятся на расстоянии $L \sim 0 - 100$ км от «оси» субдукции. Во втором диапазоне, - соответственно, $h \sim 70 - 300$ км и $L \sim 100 - 150$ км; и в III-ем: $h \sim 300 - 700$ км и $L \sim 500 - 700$ км (вставка рис. 7). Вулканы, в отличие от землетрясений, которые занимают все три диапазона, располагаются только во втором интервале значений. Легко видеть, что угол, под которым опускается источник землетрясений и вулканов, при перемещении от океана к материку, примерно равен 45° .

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 M29. 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 $\Delta p = 2a/X$. Для того чтобы величина этого давления была порядка текучести литосферы (≈ 1 кбар), при величине a , 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: $k \approx 1/a$, где k - волновое число, а частота капиллярных волн $w^2 = (a/r) k^3$ [Ландау, Лифшиц, 1986]. Как следует из рис. 7-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.

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 7-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:

$$M = 1/2 gq^2har. \quad (32)$$

Напряжение, вызываемое наклоном «балки» в области её правого конца, можно оценить по формуле Навье: $S = M/W$, где W - момент сопротивления (примерно равен объему освобожденному «балкой»), $W = 1/2qha$. Величина $S \gg q g r$. Если принять длину «рычага» равной примерно 200 - 400 км, то напряжение S 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: $w(x) = h \cos(\pi x/l)$, тогда на изгиб балки влияют изгибающий момент 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.

6. 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: $rgH = s$, где s - 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 явления 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 .

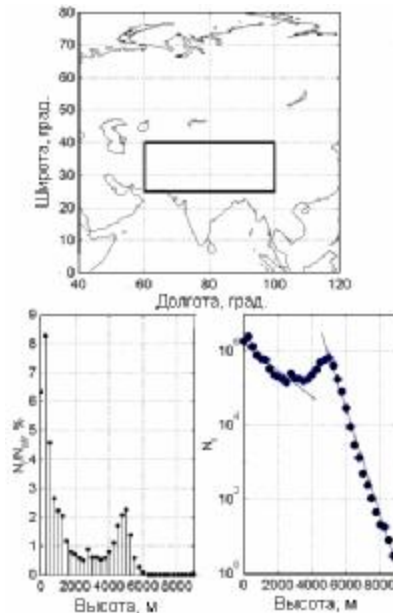


Рис.8. Высота гор. Вверху, квадрат – исследуемый регион. Слева внизу – гистограмма $N - H$. Справа внизу зависимость $\lg N - \lg H$ (N – число гор, H – их высота).

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.8). 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. 8 внизу слева). На рис. 8 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. 8, 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: $rgH \sim s$, (I) где s - предел текучести материала литосферы. Формулу для высоты гор можно получить из соотношения: $rgH^2 \sim a$ (II), (т.к. $H = a(1 - \sin\theta)^{1/2}$ и $a^2 = a/rg$, a -поверхностное натяжение). Сравнивая I и II, получаем: $H = sa^2/a$: 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: $H = a(1 - \sin\theta)/s$. Отсюда следует реологический вывод: поверхностное натяжение и сдвиговое лапласово напряжение тем выше, чем выше предел текучести. Оценив выше: $a = 10^{19}$ дин/см; $s = 10^9$ 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: $a \gg H$.

7. Физика плюма

Идея плюма, как элемента геодинамики, - возникла сравнительно недавно. Это было вызвано, с одной стороны, несостоятельностью тектоники плит, т.к. она не находила объяснения внутриплитному вулканизму и магматизму и, с другой, - успехами сейсмологии, в частности, сейсмической томографии [Nolet, et al., 2006]. Разработка и использование метода сейсмотомографии позволило выявить в мантии, в районах т.н. «горячих точек», - мантийные струи, названные плюмами. Хотя, надо заметить, что к этим данным двойное отношение: некоторые видят в них доказательство реальности плюмов, другие усматривают в них лишь сейсмические шумы [Kerr, 2006].

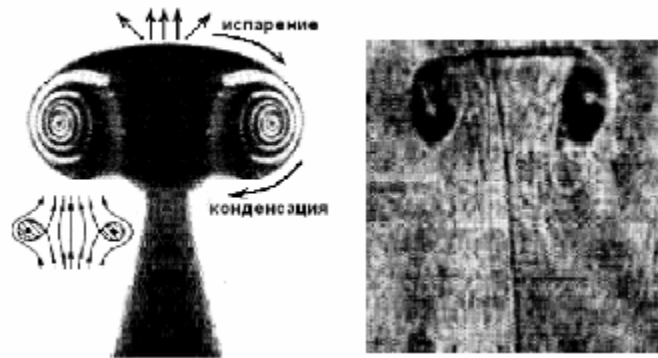


Рис. 9. Торoidalный вихрь Лаврентьев (слева) и вихрь, полученный в лабораторном эксперименте (справа).

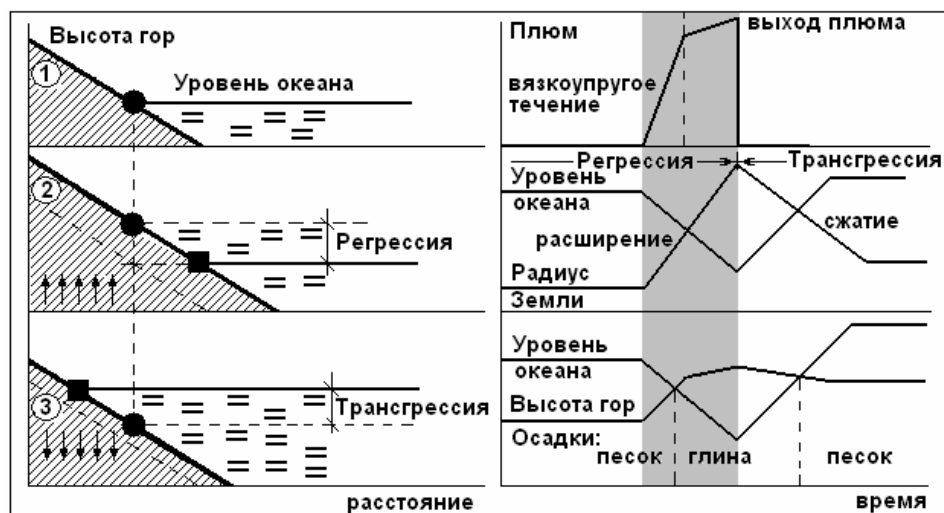
Как было выяснено, плюмы – мантийные струи пронизывают мантию от границы ядра до поверхности Земли. При выходе на поверхность они изливаются базальтами малой вязкости – траппами. Плюмы по внешнему виду напоминают поднимающийся в атмосфере тороидальный вихрь [Лаврентьев, Шабат, 1973]. В этой книге показано, что только тороидальный вихрь обладает гидродинамической устойчивостью и способен «всплыть» в атмосфере на большую высоту, сохраняя свою первоначальную форму, в то время как, обычный газовый, сферический «пузырь» очень быстро теряет форму и расплывается. В дальнейшем, развивая модель плюма, будем использовать свойство гидродинамической устойчивости тороидального всплывающего вихря. Будем полагать, что в нашей модели, понятия плюм и вихрь обозначают одно и то же явление. Горячая

струя вихря поднимается в его центре, затем, взаимодействуя с окружающей средой, приводит к её испарению, закручивается, охлаждается, частично конденсируется, опускается вниз и сливается с горячей струей. Процессы испарения и конденсации вещества среды играют важную роль в физике плюма (рис. 9).

Важный вопрос физики плюма состоит в том, какова его энергия и откуда она может черпаться? Оценим минимальную тепловую энергию, необходимую для того, чтобы плюм смог проникнуть сквозь толщину мантии проплавляя её. Положим, что минимальное сечение плюма не должно быть меньше, чем $10 \times 10 \text{ км}^2$, толщина мантии 3000 км, скрытая теплота плавления $U = 1 \text{ кДж/г}$, плотность вещества мантии $\rho = 4 \text{ г/см}^3$. Тепловая энергия $Q = \rho V U$, где V – объём вещества мантии, участвующего в прохождении плюма, $\approx 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^3$, а $Q \approx 10^{24} \text{ Дж}$, что примерно соответствует тепловому потоку Земли ($\approx 10^{21} \text{ Дж/год}$) за тысячу лет. Откуда может взяться энергия такой величины, необходимая для прохождения всего лишь одного плюма, - современная модель холодной Земли ответа не дает.

Представим себе, что плюм «вышел» на материковую поверхность Земли в районе береговой линии (рис. 10-1). В момент выхода плюма растягивающие силы направлены вверх (рис. 10-2). Уровень океана (точка) при этом понижается (квадрат), - это явление получило название регрессия. Следующим этапом по окончании цикла расширения, связанного с плюмом, происходит цикл сжатия Земли гравитационными силами (рис. 10-3). При этом уровень океана возрастает и становится выше изначального, - это трансгрессия.

В правой части рис. 10 схематично показано изменение параметров Земли в течение времени прохождения плюма (затемненная полоса). Действие плюма начинается, как следует из рисунка, с вязкоупругого течения вещества мантии. Характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие плюма: $t = \mu/G$, где μ – «вязкость» среды, а G – модуль упругости, по разным оценкам, может составлять $\sim 1 \text{ млн. лет}$.



10. Выход плюма на поверхность Земли и связанные с этим трансгрессии и регрессии.

Как известно, напряжения и деформации при вязкоупругом течении материала зависят от истории протекания процесса нагружения (деформации) во времени и характеризуются поглощением энергии в цикле деформации с постепенным её исчезновением при снятии нагрузки. При быстром возрастании давления на границе

мантии, её удлинение меньше, - чем при более медленном возрастании. И, наоборот, одно и то же удлинение может возникнуть при разных значениях силы. Естественно, всё это вносит свои коррективы в величину t .

Итак, временные этапы последовательного развития плюма включают (рис. 10):

1. «Вскипание» внешнего ядра и транспортировка «пузыря» к поверхности мантии.
2. Рост давления на границе мантии (в принципе, до мегабарных величин).
3. По достижении критического давления (порядка 10 кбар) начинается вязкоупругое течение мантии. Происходит локальный подъем части литосферы – Земля расширяется. При этом уровень моря понижается, наблюдается регрессия (см. рис. 4).
4. Плюм «всплывает» аналогично тороидальному вихрю, перенося к поверхности Земли из ядра тепло, водород, базальт и воду.
5. После подъема плюма, Земля релаксирует: начинается цикл гравитационного сжатия, выравнивается высота геоида, происходит «растекание» литосферы в области ранее поднявшегося региона, уровень океана локально повышается – наступает трансгрессия.
6. Изменение соотношения высоты гор и уровня океана изменяет характер разрушения гор, что ведет к изменению режима седиментации и изменению характера осадков: например, смена песка на глину и т.п. Этот момент может оказаться принципиальным при разработке модели, основанной на использовании идеи важной роли плюма в образовании месторождений углеводородов. Другой принципиальный момент этой проблемы состоит, в контексте нашей модели, в том, что выход вещества плюма состоит в мощнейшей «прокачке» литосферы потоком горячего водорода. Наличие водорода, как будет показано ниже, приводит к приобретению веществом Земли ряда принципиально новых качеств.

Рассмотрим проблему т.н. гавайских «горячих точек» и их перемещению по поверхности океана во времени. Как мы отмечали, рост океанов в процессе эволюции Земли связывается с последовательным прохождением 4-х этапов: 1) Юрский суперхрон-суперплюм, 2) период Мезозойских инверсий, 3) Меловой суперплюм-суперхрон и, наконец, 4) начавшийся 80 млн. лет тому назад, период современных инверсий геомагнитного поля. В Тихом океане часто встречаются регионы, в которых можно выделить все четыре этапа, но не везде. В районе траверса: Камчатка – Гавайи (1 и 2 на рис. 11-а) можно выделить два из них. Это образовавшийся в период 120-80 млн. лет назад Меловой суперплюм – зона спокойного геомагнитного поля (3 - на рис. 11). Источник гавайского суперплюма отмечен черной стрелкой и треугольником. Здесь же показано направление спрединга суперплюма. Граница между 3 и 2 имеет возраст 120 млн. лет. Здесь примерно 80 млн. лет тому назад начался спрединг (белая стрелка и направление спрединга), сопровождавшийся возникновением срединно-океанического хребта (СОХ). Зона спрединга СОХ отмечена полосовыми магнитными аномалиями прямой и обратной полярности геомагнитного поля. Каждой из стрелок соответствует область пространства на границе внешнего ядра, где, собственно, и зарождается и тот и другой спрединг. Угловые расстояния между стрелками в процессе эволюции Земли - остаются неизменными. Поэтому, по мере наращивания океанической коры региона современных инверсий, черная стрелка перемещается по области «постоянного поля», т.е. по области Мелового суперхрона, генерируя при этом Гавайскую вулканическую гряду.

Таким образом, наша модель находит непротиворечивое объяснение, почему и как происходит дрейф «горячей точки» по океаническому дну «зоны спокойного поля». Остается выяснить причину, почему магматизм горячей точки в этой области пространства имеет прерывистый характер. Обратимся к рис. 11-б, здесь на первой полосе (1) показаны временные интервалы спрединга трех суперплюмов. На второй полосе (2)

показаны временные области спрединга, соответствующие работе СОХ. Полоса 2 является обратным отражением полосы 4, где показана шкала инверсий геомагнитного поля, на которой черные полосы обозначают современную полярность поля, а белые = противоположную полярность. Согласно модели горячей Земли, во время современной полярности поля на Земле происходит цикл её сжатия, в период обратного поля – расширения. Именно в эти периоды происходит интенсивный спрединг в зонах СОХ, отраженный на полосе 2. Предположим, что спрединг горячей точки менее интенсивен, чем спрединг СОХ. При выполнении этого, вполне очевидного условия, третья полоса показывает спрединг горячей точки. Таким образом, происходит «дробление» второго и третьего суперплюмов (1) на более короткие периоды активизации. Черные полосы между полосами 3 и 4 показывают время измерений параметров гавайских горячих точек.

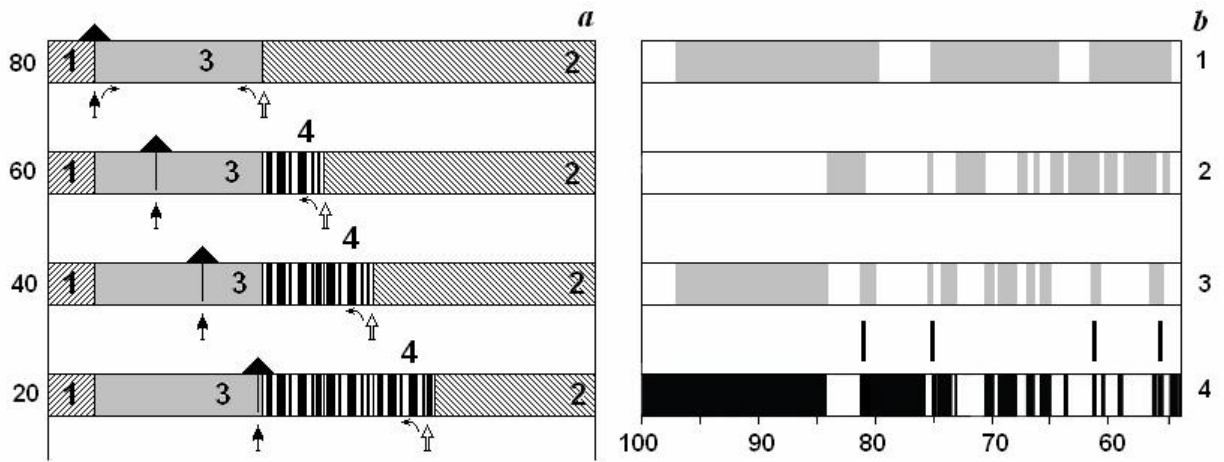


Рис. 11. Плюмы и суперплюмы. Перемещение «горячей точки» - *a*. 1 – Азия, 2 – Америка, 3 – меловой суперплюм, 4 – зона инверсий. Цифры слева – время в млн. лет, черная стрелка и треугольник – «горячая точка», белая стрелка – СОХ. Модель «дробления» суперплюма - *b*: 1 – суперплюмы, 2 – периоды «работы» СОХ, 3 – плюмы и суперплюм, 4 – шкала инверсий.

Итоги

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

- 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 области 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.

- 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 H/R , то окажется, что эта величина порядка 10^{-3} . Сравнивая величины гравитационных аномалий с силой тяжести Dg/g , убеждаемся, что эта величина на порядок меньше (10^{-4}), в то время как отношение высоты геоида к радиусу Земли $N/R \approx 10^{-5}$. 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, планет и больших спутников.