

Глава VII. ГЕОДИНАМИКА ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Термин “геодинамика” приобрел в течение последних 40 лет особую популярность в науках о Земле в связи с созданием и интенсивным внедрением в эти науки плитной тектоники. В более широком плане, под геодинамикой подчас понимают движения в коре, мантии и ядре Земли. Иногда сюда же относят и ту область науки, которую Дж. Педлоски (1984) выделил в геофизическую гидродинамику. Реже, к геодинамике относят динамику ионосферы и магнитосферы.

В этой книге рассмотрены некоторые вопросы геодинамики, имеющие отношение к модели горячей, расширяющейся и пульсирующей Земли. Геологические и, естественно, геодинамические аспекты расширяющейся Земли изучены и подробно описаны в ряде статей и монографий. Следует выделить фундаментальные труды австралийского геолога профессора С.У. Кэри (Carey, 1976; Кэри, 1991).

Развиваемые в этой книге идеи относятся к области науки, называемой геофизической гидродинамикой. В этой главе рассмотрены ряд вопросов, которые, по сути, относятся к разделу физики «Гидродинамика». По-видимому, правильно было бы включить сюда и физику землетрясения, как раздел гидродинамики, изучающий физику ударных волн, в том числе и в твердом теле. Однако это нарушило бы целостность следующей главы, посвященной одному из крупнейших разделов физики Земли - сейсмичности.

Геодинамика (тектоника плит) занимает “ключевую” позицию в современной геологии, однако, именно здесь скопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов, противоречий и парадоксов. Перечислим некоторые из них:

- Несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения (показывающее отсутствие глобальной конвекции в мантии);
- Несоответствие между незначительным увеличением периметра Тихого океана и идей распада Пангеи – Гондваны, парадокс Мезервея, показывающий невозможность расположения Гондваны на Земле современного радиуса;
- Нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов, направлению дрейфа материков (отрицающая общепринятый в палеомагнитологии подход);
- Несоответствие фактических данных о Земле, её ядре, мантии, форме геоида и гравитационным аномалиям, идее конвекции в мантии и роли субдукции в этой конвекции и т.п.

В главе VII обсуждается попытка найти решение этих проблем в контексте модели горячей, расширяющейся Земли.

VII. 1. Геодинамика внешнего ядра и фрактальный характер инверсий.

Информация о периодах инверсий неоднократно привлекала внимание исследователей, которых интересовал, в частности, такой вопрос: можно ли сказать что-либо определенное о характере эволюции Земли? Например, развивалась Земля случайным образом, или в природе ее эволюции заложены какие-то принципы? Надо сказать, что анализ данных по инверсиям (Харланд и др., 1985) приводил авторов к различным выводам: от полного отрицания каких-либо закономерностей, до выделения четкой периодичности. В течение последних примерно 80 млн. лет инверсии на Земле случались в среднем примерно 2-3 раза в миллион лет. В течение предыдущих 40 млн. лет (120 – 80) инверсий не было вовсе, а во время предыдущих 40 (от 160 до 120 млн. лет назад) - характер инверсий был примерно тот же, что и в течение последних 80 млн. лет (см. рис. 7-1). Период 120 - 80 млн. лет назад, в течение которого инверсий вообще не было, получил название меловой суперхрон. По некоторым данным, ещё ранее 160 млн. лет тому назад, тоже происходил суперхрон - юрский, еще раньше (250-300) - карбонский и т.п. В истории магнитного поля Земли суперхроны случались довольно регулярно, они перемежались периодами частых инверсий. Замечено, что длительность периодов суперхронов со временем постепенно увеличивалась таким образом, что последний из них был самым длинным.

О прошлом геомагнитного поля имеется подробная информация, в частности, считается, что большая частота инверсий каким-то образом связана с активизацией геодинамических процессов. Однако, с другой стороны известно, что самые энергетически сильные события на Земле происходили в периоды суперхронов (Печерский, 2003). Эти события получили название суперплюмов. В этой связи следует выяснить, имеется ли в этой информации скрытая от глаз периодичность, или смена полярности поля представляет собой процесс, включающий набор статистически независимых друг от друга событий (Кузнецов, 1998). Следует также выяснить, в чем же состоит природа суперхронов в контексте модели горячей Земли, а также, попутно, определить и физику суперплюмов.

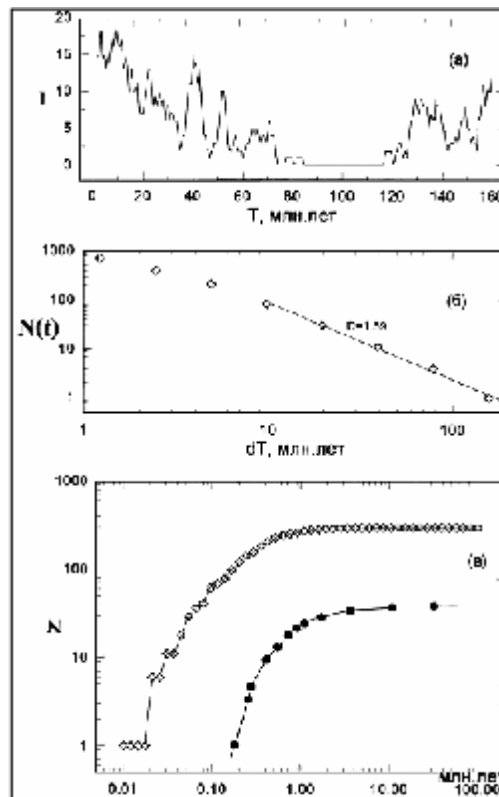


Рис. 7-1. Распределение количества инверсий I , произошедших в течение трех млн. лет, за $T = 160$ млн. лет эволюции геомагнитного поля (Харланд, 1985) - (а); б - оценка величины клеточной фрактальной размерности ($D = \lg N(t) / \lg dT$); в - распределение интервалов времени между инверсиями, меньшими, чем заданный (N - количество интервалов, T - продолжительность интервала). Верхняя кривая - по данным (Харланд, 1985), нижняя - по модели.

Результаты анализа частоты инверсий оказались противоречивы: от полного отрицания наличия периодичности А.А.Рузмайкиным и В.Л.Трубицыным (1992), до предложения А.Мазоуд и С. Лаж (1991) использовать цикл изменения частоты инверсий длительностью в 15 млн. лет, как количественный тест. Рузмайкин и Трубицын, анализируя статистику инверсий за последние 80 млн. лет по шкале Харланда и др. (1985), показали, что моменты обращений поля распределены по случайному (пуассоновскому) закону. Они специально выясняли такой вопрос: может ли в случайном процессе инверсий поля присутствовать периодичность? Оказывается, что появление пика в спектре мощности случайного процесса возможно, однако, по мнению авторов, это необязательно соответствует наличию какой-либо периодической составляющей (Рузмайкин и Трубицын, 1992). Иванов (1993) с целью поиска периодичности и самоподобия исследовал те же данные (за 160 млн. лет) и отметил, что идея масштабного

самоподобия палеомагнитной шкалы неосознанно заложена ее авторами (Mandelbrot, 1983; Turcote, 1989) во введенной ими терминологии, определяющей иерархию эпох поведения геомагнитного поля. Последовательно выделяются субхроны, хроны, суперхроны и гиперхроны; причем их продолжительность прогрессивно увеличивается. Иванов (1993) подводит некоторую количественную базу под идею самоподобия палеомагнитной шкалы. Он показывает, что на масштабах времени порядка 1 млн. лет множество инверсий геомагнитного поля можно рассматривать как поток независимых событий, аналогичный пуассоновскому процессу. На больших масштабах ситуация меняется и поток событий не является полностью случайным, а проявляет хорошо выраженное самоподобие. Такая характеристика свидетельствует, по мнению Иванова (1993), о том, что последовательность инверсий, оставаясь хаотической, не является полностью случайной (так называемый слабый хаос). Иванов (1996) рассмотрел мультифрактальные свойства множества обращений магнитного поля и оценил размерность аттрактора. Оценка автора фрактальной размерности инверсий показывает заметную кластеризацию событий во времени и наличие самоорганизации.

Mazaud и Laj (1991) анализировали различающиеся шкалы геомагнитных инверсий за последние 100 млн. лет и получили несколько отличающиеся один от другого результаты. Общим для всех трех шкал было то, что выявлялись характерные пики в спектре мощности: причем, для каждого спектра, - свой. Для разных шкал эти пики соответствовали периоду самоподобия в 14 - 16,5 млн. лет. Эти авторы полагают, что наличие пика в спектре мощности может служить своеобразным количественным тестом для других геофизических явлений. Mazaud и Laj не дают физической интерпретации полученного результата, однако, полагают, что это явление, скорее всего, связано с конвекцией жидкости в земном ядре, причем это движение находит свое отражение в процессах, происходящих в мантии, в частности, в нижней мантии, на границе ее с ядром. Принято считать, что замеченная периодичность, вероятно, контролируется длиннопериодными вариациями геодинамо.

Постановка задачи. На рис. 7-1 изображен ряд инверсий (I) геомагнитного поля, случившихся за время последних 160 млн. лет (Харланд и др., 1985). Ниже, на этом рисунке, приведена оценка клеточной фрактальной размерности ряда периодов времени между инверсиями, полученная методом покрытий (Федер, 1991). Она выражается зависимостью:

$$N(d) = ad^D, \quad (7.1)$$

здесь d - имеет смысл длительности периода (dT) между инверсиями, $a \sim p(t)$ вероятность того, что произвольно выбранный интервал будет иметь продолжительность t , величина фрактальной размерности $D = 1,59$, а $N(d)$ означает число интервалов. Зависимости подобного типа принято считать скейлинговыми соотношениями. В нашем случае, это выражение характеризует масштабную инвариантность процесса для продолжительностей интервалов одинаковой полярности поля (Иванов, 1996; Федер, 1991). Полученная зависимость показывает, что количество интервалов, например, длительностью в 10 млн. лет в три раза больше, чем периодов в 20 млн. лет и т.п. Это соотношение справедливо для периодов, больших одного млн. лет (Иванов, 1996). Еще ниже показан график количества интервалов N с длительностью (верхняя кривая), меньшей, чем соответствующий период, заданный по оси T , на которой длительность интервалов приведена в млн. лет.

Сформулируем задачу: необходимо обосновать возможный физический механизм, связанный с генерацией геомагнитного поля, в котором могли бы осуществиться, по крайней мере, две особенности. Во-первых, при генерации поля должны проявиться явления, приводящие к смене полярности поля и, во-вторых, количество периодов различных полярностей поля $N(t)$ должно быть:

$$N(t) \sim t^D, \quad (7.2)$$

где $D \approx 1,6$. Примем во внимание то, что какова бы ни была модель генерации геомагнитного поля, она в любом случае оказывается тесно связанной с процессами, происходящими в жидкой части земного ядра. По всей видимости, именно здесь можно попытаться выявить искомые механизмы.

Модель. Обратимся к экспериментальным результатам, полученным (Giardini et al., 1988) при анализе спектров собственных колебаний Земли, точнее, их splitting - функций, возбуждаемых сильными землетрясениями. Анализ результатов показывает, что ${}_{11}S_4$ мода колебаний, максимум интенсивности которых приходится на внешнее ядро, четко фиксирует картину, состоящую из симметрично расположенных пятен (6 “черных” и 6 “белых”, см. рис. 7.2). Каждое из этих пятен означает, что плотность вещества ядра чуть больше (на 0,2 %), или чуть меньше ее среднего значения. Близкие структуры пространственного распределения скорости Р-волн и плотности вещества наблюдаются на картах splitting - функций других мод собственных колебаний (в частности, ${}_{13}S_2$ - и ${}_{13}S_3$ -моды), интенсивность которых по глубине (kernels-функции) тоже приходится на внешнее ядро. Правда, эти изображения не столь четки и симметричны, как в случае ${}_{11}S_4$ - моды, однако, и на них можно различить шесть белых пятен, в которых интенсивность splitting-функций, и связанное с ней изменение плотности, отрицательны, и шесть черных, в которых эти параметры положительны.

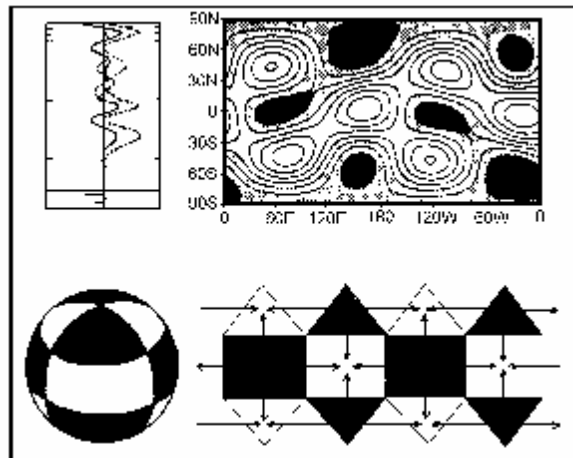


Рис. 7-2. Splitting-функция для моды ${}_{11}S_4$, слева - kernels-функция для $s = 4$ (точки - V_p , сплошная - распределение плотности) (Giardini et al., 1988) - вверху. Внизу слева - сферическое колебание с тессеральной гармоникой P^3_4 , справа - структура конвективных ячеек во внешнем ядре.

Предположим, что отмеченная нами структура не случайна, а наоборот, показывает истинное пространственное распределение плотности вещества внешнего ядра. Такая картина может возникать, например, если в ядре происходит ламинарная 12-ячеистая конвекция. Внешнее ядро Земли принято считать конвективным, а конвекцию в нем - турбулентной. Дело в том, что число Рэлея (Ra) в ядре больше чем критическое, которое условно делит конвекцию на - турбулентную ($Ra > 10^6$) и ламинарную. Надо сказать, что это, весьма условное деление привнесено из экспериментов, производимых в основном с водой. Насколько известно автору, еще никто не доказал, что такое деление типа конвекции на турбулентную и ламинарную справедливо для вещества внешнего ядра, для которого до сих пор еще остается дискуссионной величина вязкости (до 10 порядков).

Заметим, что модель динамо предполагает совсем другой вид конвекции во внешнем ядре. Тем не менее, есть основания предположить, что пространственная структура внешнего ядра, выявленная при анализе мод собственных колебаний (splitting- функций),

соответствует конвекции в ядре, где образовались 12 ячеек. Из них, в 6-ти вещество ядра “всплывает”, а в 6-ти других - “тонет”. Эти ячейки, по своей структуре, весьма похожи на собственное сферическое колебание с тессеральной гармоникой типа P_4^3 . Здесь обозначены степень гармоники $j = 4$, и ее порядок $m = 3$. На рис. 7-2 показана схема конвективного движения вещества в такой структуре, состоящей из 12 ячеек.

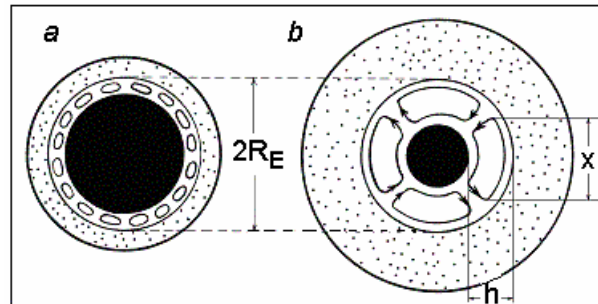


Рис. 7-3. Конвекция с образованием устойчивых ячеек Рэлея-Бенара на начальном этапе эволюции Земли (а). По мере увеличения толщины внешнего ядра h количество ячеек уменьшается (б).

В различных моделях внутреннего устройства Земли принимаются различные схемы эволюции ядра, как внешнего, так и внутреннего. В некоторых из них радиус внутреннего ядра постепенно увеличивается, в других моделях, он уменьшается. Внешнее ядро в некоторых моделях остается неизменным, в других - увеличивается и т.п. Согласно нашей модели, размер внешнего ядра остается постоянным, в то время как радиус внутреннего ядра постепенно уменьшается. В процессе эволюции Земли, толщина ее жидкого ядра $h(t)$ возрастает (см. рис. 7-3), что обязано приводить к перестройке конвекции, т.к. горизонтальный линейный размер устойчивой конвективной ячейки x связан с ее высотой $h(t)$ примерным соотношением: $h \gg 0,5x$. Возможно, эта пропорция определяется “золотым” сечением: $x = 0,618$, $h = 0,382$. В любом случае, размеры устойчивой конвективной ячейки h и x взаимосвязаны.

Как известно, тепловая конвекция обладает фрактальной структурой, фрактальное подмножество меры конвективной ячейки определяется функцией $f(x)$ (Федер, 1991), изображенной в правом нижнем углу рис. 7-4. Примем, что функция $f(x)$ (характеризующая спектр сингулярностей процесса) имеет смысл устойчивости состояния конвективной ячейки: когда $f(x) \approx 1$, ячейка обладает наибольшей устойчивостью и, по мере уменьшения ее величины ($f(x) < 1$), устойчивость ячейки уменьшается. Из рисунка видно, что функция $f(x)$ асимметрична относительно параметра x : при $x < x_0$, функция убывает примерно в три раза быстрее, чем в случае $x > x_0$.

Ориентируем ось x вдоль экватора границы ядро-мантия. Построим вдоль этой оси графики функций $f(x)$ для различных x_0 (аналогичных изображенным в правом углу рис. 7-4), каждое значение которых:

$$x_{0j} = 2\pi R_E / j, \quad (7.3)$$

где x_{0j} - длина устойчивой конвективной ячейки, R_E - радиус внешнего ядра, j - количество конвективных ячеек вдоль экватора внешнего ядра (степень гармоники) и m - число ячеек вдоль меридиана (порядок гармоники). Примем одно из условий устойчивости конвекции: $j = m$. Еще одно условие устойчивости мы оговорили выше, оно касается отношения высоты конвективной ячейки к ее размеру по горизонтали: $h \approx 0,5 x_0$. На рис. 7-4, в координатах $x-f(x)$ изображены значения $f(x)$ для конвективных ячеек, у которых j принимает значения: $j = 2, 4, 6, 8, 10, 12$, ($x_{0j} = 11; 5,5; 3,6; 2,75; 2,2; \dots$ тыс. км). По оси ($-y$) отложена толщина ядра h (тыс. км) = $R_E - R_G$, где R_G - радиус внутреннего ядра. Из рисунка следует, что для различных значений j , функции $f(x)$ значительно между собой перекрываются. Это означает, что конвективная ячейка может оказаться устойчивой

в сравнительно малой области значений x (примерно в $1/4$ от величины x_0 , в его окрестности).

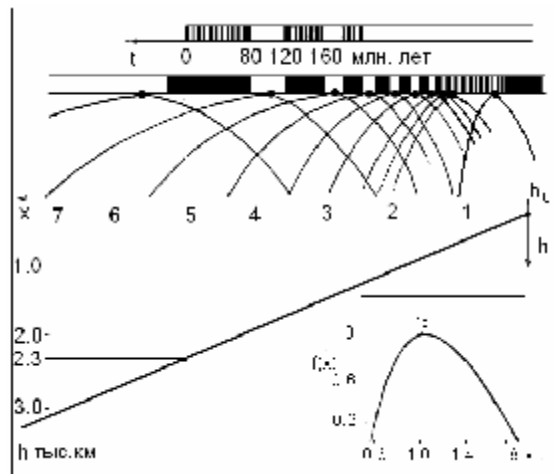


Рис. 7-4. Графики функций, характеризующих устойчивость конвективных ячеек с различными размерами x . Вверху - шкала инверсий (черные) и суперхронов (белые интервалы). Справа внизу - фрактальная мера конвективной ячейки $f(x) = 1$, ($x_0 \approx 1$) (Федер, 1991).

Уточним предположения, о которых шла речь выше:

- В процессе эволюции Земли величина h возрастает.
- В определенные моменты времени происходит смена режима конвекции.
- Геомагнитное поле оказывается устойчивым в те моменты времени, когда устойчива конвекция, каков бы ни был механизм его генерации, и оно меняет свою полярность в те моменты, когда меняется режим конвекции. (Надо сказать, что наши допущения не совсем безосновательны, они подкрепляются развиваемыми в Главе VI идеями генерации геомагнитного поля).
- Допустим, что на “долю” устойчивой конвекции приходится примерно $1/4$ от всей длины интервала ($x_{oj} - x_{oj-2}$), в то время как на долю периода инверсий - оставшиеся $3/4$. Последнее предположение вызвано асимметрией функции $f(x)$.

Принятые предположения позволяют рассчитать ряд длин $I_j = x_{oj} - x_{oj-2}$. Каждое из полученных таким образом чисел составляет упорядоченное численное множество: 5,5; 3,6; 2,7; 2,2; 1,83; 1,57; 1,37; 1,22; 1,1; 1,0 и т.д. (в тыс. км). Каждое из этих I разбиваем на $1/4$ и $3/4$ (например, вместо 5,5 будем иметь: 4,1 и 1,4 и т.д.) и составляем новое множество. Числа этого множества имеют в нашей модели смысл длительностей режимов неустойчивой (периодов инверсий) и устойчивой (суперхронов) конвекции. (Это оказывается возможным при выполнении очевидного условия: $t \sim I/v$, где v скорость изменения h и, соответственно, x и I).

С помощью метода покрытий, строим кривую (нижнюю на рис. 7-1-в), которая оказывается аналогичной верхней (построенной по данным каталога Харланда и др., 1985). Похожесть обеих кривых (рис. 7-1-в) говорит о том, что мы, возможно, правильно подобрали простую физическую модель, адекватно отражающую природу явления инверсий. Чтобы еще раз убедиться в этом, оценим величину фрактальной размерности полученного нами множества. Количество интервалов $N(t)$ этого счетного множества аппроксимируется зависимостью:

$$N(t) \sim t^{-1.6}, \quad (7.5)$$

что является скейлинговым соотношением. Полученная фрактальная размерность D (степень при t) совпадает с D , оцененной по данным каталога инверсий (см. рис 7-1-б). Это обстоятельство подкрепляет уверенность в том, что мы, возможно, нашли верный

механизм явлений, связывающих фрактальные свойства и масштабную инвариантность инверсий поля с изменением режима конвекции в ядре Земли.

Получим аналитическое выражение для D . Как следует из (7.1):

$$I_j = x_{0j} - x_{0(j-2)} \gg 2\pi R_E/j^2 \quad (7.6)$$

Количество интервалов:

$$N(t) = 2 \times 2\pi R_E/I = 2j^2, \quad (7.7)$$

длительность интервала $t \gg I/v$ (v - скорость “плавления” ядра), что составляет часть от полной длительности процесса $v_o = h/v$, или, безразмерное время интервала $t' = 2\pi R_E/h j^2$, а т.к. $2\pi R_E \approx 10 h$, то $t' \approx 10/j^2$.

Хаусдорфова размерность:

$$D = \lim_{(t \rightarrow 0)} \ln N(t)/\ln(1/t') \approx \ln 2j^2/\ln j^2/10. \quad (7.8)$$

Если принять $D = 1.6$, то можно оценить число j :

$$(\ln 2 + \ln j^2)/(\ln j^2 - \ln 10) = 1.6$$

Величина j оказывается порядка $j \approx 30$, что соответствует $x_o \approx 700$ км, а $h \approx 350$.

Обсуждение модели. Полученная нами зависимость: $N(t) \sim t^{-1.6}$ связывает изменяющуюся в процессе эволюции Земли длину конвективных ячеек I с их числом j вдоль экватора ядра Земли. Линейные размеры ячеек изменяются во времени. Это дает нам возможность оценить порядок скорости “плавления” внутреннего ядра $v = dh/dt$, и сравнить его со скоростью “геологических” процессов.

В настоящее время величина $h = 2,3$ тыс. км, инверсии геомагнитного поля продолжаются в течение примерно 80 млн. лет. Длительность предыдущего (мелового) суперхрона составляла 40 млн. лет. Следовательно, длительность периода частых инверсий должна быть примерно в 3 раза длиннее, т.е. 120 млн. лет. Отсюда следует, что на Земле инверсии магнитного поля могут продолжаться еще примерно 40 млн. лет. Затем должен начаться (см. рис. 7-4) очень длинный суперхрон, причем, он будет продолжаться практически все оставшееся время существования геомагнитного поля, которое, возможно, вообще прекратит свое существование в тот момент, когда внутреннее ядро полностью “расплавится”. (Возможно, такое явление уже произошло на Луне и Марсе). Используя рис. 7-4, можно прийти к выводу, что в течение “последних” 100 млн. лет величина h увеличилась примерно на 600 км, что соответствует скорости “плавления ядра” $v = 0,6$ см/год. Надо сказать, что с точки зрения привычных для нас скоростей геологических процессов, эта оценка вполне правдоподобна ($dx/dt \approx 1$ см/год).

Наша модель открывает путь для объяснения широко обсуждающейся (Larson, Olson, 1991; Fuller, Weeks, 1992; Cortillot, Besse, 1987) корреляции между суперхронами и резким увеличением интенсивности магматизма - суперплюмами. Действительно, в периоды устойчивой конвекции (т.е. в периоды между суперхронами) охлаждение ядра и теплоперенос из него в мантию будет происходить более эффективно, чем в периоды неустойчивой конвекции. Следуя модели, в течение периода неустойчивой конвекции, внутреннее ядро может «перегреться» и даже «закипеть». При этом «пузыри пара» могут подниматься к границе ядро-мантия и быть причиной возникновения плюмов и суперплюмов. Эта, отмечаемая многими геологами, корреляция не противоречит нашей модели.

Обратим внимание на полученное нами скейлинговое соотношение, имея ввиду, что $N(t)$ имеет смысл частоты w . Перейдем от: $N(t) \sim t^{-1.6}$ к спектру мощности флуктуаций периодов обращений поля, и получим: $S(w) \sim w^{-g}$, где $g > 1$. Частотная зависимость вида $S(w) \sim w^{-g}$ для спектра мощности известна в различных областях физики под наименованием $(1/f)$ фликкер-шума. Ряд временных интервалов инверсий и суперхронов, по-видимому, можно уподобить фликкер-шуму, аналогично тому, как это было сделано, например, А.А. Бердыевым и В.А. Мухамедовым (1987), где ставился вопрос, не является

ли последовательность землетрясений, имеющая вид: $N(e) \sim e^{-g}$ (закон Гутенберга-Рихтера), фликкер-шумом. Как показано Г.Н. Бочковым и Ю.Е. Кузовлевым (1983), фликкер ($1/f$) - шум обычно сопровождает стационарно протекающие необратимые процессы, он является результатом флуктуаций диссипативной системы, находящейся в термодинамически неравновесном состоянии. Иногда он интерпретируется как свойство, присущее системе, обладающей широким набором времен релаксации t , суммирующихся с весом t^{-1} . Фликкер-шум принято считать универсальным свойством диссипативных систем переноса. Американцы (Bak et al., 1987) сделали попытку объяснить природу фликкер-шума, как следствие явления самоорганизации динамической системы. Идея самоорганизации тесно связана с разбиением изначально простой многоэлементной динамической диссипативной структуры на фракталы. Подобные идеи развиты Г. Хакеном (1980) в синергетике, основным базисом которой является использование уравнения самоорганизации Фоккера-Планка, в котором принципиальным является наличие в системе и взаимодействие в ней двух процессов: дрейфа и диффузии (перколяции). В этом плане, очевидно, что процесс “плавления” внутреннего ядра не может быть единственной причиной проявления Землей фрактальных свойств и кластеризации. По всей видимости, ему “отводится роль” дрейфового механизма. Как мы отмечаем, фрактальные свойства присущи конвекции, и в этом случае, явление перколяции может состоять в изменении её режима от более устойчивого ламинарного, к менее устойчивому, - турбулентному. Заметим, что подобные переходы характеризуют самоорганизующиеся фрактальные структуры (Климонтович, 1996). С другой стороны, известно, что интенсивность фликкер-шума возрастает в структурах, обладающих фрактальными свойствами. По-видимому, именно этим объясняется наличие $1/f$ -зависимости в инверсиях геомагнитного поля. Причина рассматриваемых явлений, скорее всего, лежит в самом характере эволюции Земли, как диссипативной структуры, проявляющей, при изменении ее термодинамических характеристик, фрактальные и скейлинговые свойства.

VII. 2. О чем говорят параметры фигуры Земли $e = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$?

Парадокс Эверндена. Заголовком к этому параграфу взято название статьи Дж. Ф. Эверндена (1997). Автор анализирует известную монографию Г. Джеффриса (1960) в части оценки величин параметров, определяющих фигуру Земли, сравнивает результаты Джеффриса с работой Ламба (1947) и приходит к ряду нетривиальных выводов. Основной из них состоит в том, 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 $e = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило: $1/H \gg 1/e$ [$H = (C - A)/C$], где C и $A = B$ - полярный и экваториальные моменты инерции Земли, $e = 5/4 \cdot w^2 a^3 / GM$ - сжатие Земли, w - скорость её вращения, a - экваториальный, c - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию: $1/e = a/(a - c)$. Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом $T = 24$ часа, выполняется при: $1/e = 232$. Как известно, у Земли: $1/H = 305.5$, $1/e = 297.8$ и $1/H - 1/e = 7.8$, а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток T для планеты, имеющей размер Земли и ее среднюю плотность, должна быть равна: $T = 27.2$ часа, а не $T = 24$, как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения T соответствует $1/e = 232$, причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для $T = 22$ часа, Эвернден подсчитал: $1/e = 200$. Он пришел 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. Иначе, вывод, к которому приходит Эвернден: Земля никогда не имела сжатия $1/232$. Он формулирует следствия из этого вывода. Получается, что у Земли:

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

Отдавая должное автору и его смелому утверждению о негидростатичности Земли и отмеченному им несоответствию T и $1/e$, надо заметить, что сделанные им выводы излишне категоричны и противоречат наблюдениям. Например, группой сибирских геофизиков (Крылов и др., 1993), 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. Может сложиться впечатление, что его выводы противоречат модели горячей Земли, согласно которой мантия наращивается на границе с ядром и, следовательно, если Эвернден прав, и нижняя мантия, без какой-либо динамики ее вещества, существует с момента образования Земли, то, следующего из модели горячей Земли, явления - происходить не может. Можно ли найти естественное и очевидное объяснение несоответствию длительности суток и сжатию в рамках нашей модели? Попытаемся найти такое решение...

Ответ на вопрос Эверндена. Суть парадокса, замеченного Эвернденом, заключается в том, что Земля негидростатична. Это выражается в том, что для $T = 24$ часа, Земля должна была бы обладать обратным сжатием $1/e = 232$, в то время как она имеет $1/e = 298$. Выводы, к которым приходит Эвернден: - “Земля всегда была такой” и - она никогда не была гидростатичной. Заметим, что Эвернден не сомневается в том, что Земля раньше вращалась заметно быстрее, правда, причину замедления он не обсуждает.

Вопрос Эверндена поставим в такой плоскости: была ли на Земле ситуация, когда $1/e = 232$, или сжатие Земли всегда было $1/e = 298$? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то $e = 0$, а $1/e = \infty$. Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали, $1/e_g = 232$, а она имеет: $e_g > e > 0$. В течение эволюции радиус Земли R увеличивался, возрастал и период вращения T . Запишем закон сохранения момента количества движения Земли: $MvR = \text{const}$. Скорость $v = dR/dT$, следовательно, период тоже возрастал: $T \sim R^2$. Длительность периода вращения $T = 16$ часов примерно соответствует (по нашей модели) времени около 400 – 500 млн. лет назад (рис. 3-9), когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а жесткая мантия стала наращиваться позже. Этот момент соответствует: $1/e = 100$ (при $T = 16$ ч.). На рисунке 7-5 прямая 1 показывает зависимость $1/e(T)$ для реальной Земли $1/e = 298$ при $T = 24$ ч. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ($1/e \sim T$) для гидростатичной Земли (Эвернден, 1997). Разность величин $1/e$ показывает степень негидростатичности Земли. Из этого рисунка следует, что степень негидростатичности Земли увеличивается по мере увеличения T , иначе, по мере её эволюции и расширения. Сплюснутость гидростатичной, “жидкой” Земли больше, чем жесткой. Обозначим экваториальный радиус “жидкой” Земли: $a_1 = a_0 (1 + e_1/3)$, а

“жесткой, $a_2 = a_0 (1 + e_2/3)$. Введем параметр $d = (a_1 - a_2)/(a_1 - a_0) = 1 - e_2/e_1$. Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии $d = 0$, что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли, $d = 0.22$ (22 %). Для абсолютно твердой сферы: $d = 1$. Введенный нами параметр, в определенном смысле, играет ту же роль, что и числа Лява. Он показывает, насколько жестче становится Земля, точнее, её мантия, по мере эволюции. В отличие от нашего параметра, числа Лява для абсолютно твердой сферы равны нулю и больше нуля, для однородной жидкой сферы.

Парадокс Эверндена разрешается в нашей модели горячей Земли. Параметр $e = 1/298$ показывает, что Земля расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения $1/e$. Степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Вернемся к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой, с обратным сжатием $1/e = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать?

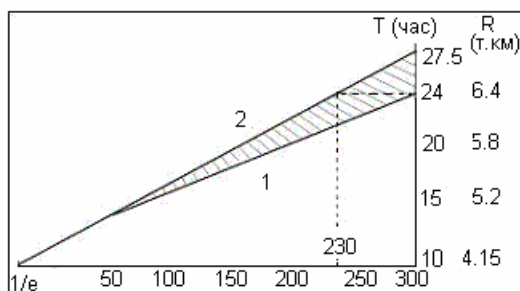


Рис. 7-5. Зависимость величины обратного сжатия $1/e$ от длительности периода вращения Земли T для: 1 - реальной и 2 - гидростатической Земли.

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 7-5, откуда следует, что Земля, эволюционируя и расширяясь, путем наращивания толщины мантии, становилась все в меньшей и меньшей степени гидростатичной. Раньше Земля была сплюснута в большей степени и, по мере уменьшения скорости её вращения, она «отслеживала» скорее не изменение ω , а dR/dt . В частности рис. 3.16 Главы III демонстрирует поразительную пространственную корреляцию акустических свойств внутреннего ядра и мантии, а так же высоты геоида. При этом внешнее ядро не обладает таким очевидным совпадением своих акустических свойств с аналогичными свойствами внутреннего ядра и мантии. Этот рисунок показывает очевидную взаимосвязь земных оболочек.

Согласно нашей модели, генерация мантии происходит в D''-слое, скорость процесса кристаллизации «контролируют» pT -условия в этом слое, которые, в свою очередь, определяются гидродинамикой внешнего ядра и её степенью сжатия. Так как внутренние оболочки Земли всегда имеют сжатие меньше, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле $1/e = 298$, а не 232.

VII. 3. Расширяющаяся Земля и парадокс Мезервея.

Рассмотрим вопрос: имеются ли геологические данные, свидетельствующие в пользу расширения Земли? Будем пользоваться литературой, посвященной этому вопросу, не вдаваясь в обсуждение достоверности приводимых здесь геологических данных.

Образование океанов. Согласно нашей модели, основная масса океанов образовалась синхронно с кристаллизацией мантии, как сопутствующий процесс. Модель подтверждает рисунок 3-4 (глава III), согласно которому современные океаны возникли примерно 160 млн. лет назад. Возможна ли ситуация, чтобы океаны «перетекали» с места на место, как это следует из плитной тектоники? Для выяснения этого вопроса, обратимся к книге Е.М. Рудича (1984), где показано, что в течение последних 160 млн. лет объем Мирового океана значительно увеличился. Эти данные получены на основе анализа результатов

глубоководного бурения (более 500 скважин в течение 70 рейсов исследовательского судна «Гломар Челенджер») акватории Мирового океана, исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением и оценки толщины океанических осадков.

В результате изучения акватории Мирового океана выяснилось, что имеются как общие черты для трех океанов (Тихого, Атлантического и Индийского), так и весьма существенные отличия Тихого океана от других. Расчеты, приведенные в книге Рудича, демонстрируют, что в течение «последних» 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. Автор обращает внимание на то, что «... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. Мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет» (Рудич, 1984, с. 232).

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

Наша модель позволяет оценить величину h на начальном этапе эволюции Земли. Обратимся ещё раз к рис. 3-1, откуда следует, что 4 млрд. лет тому назад толщина мантии составляла всего 300 км, а радиус Земли, соответственно, $0.6 R$, $S_{\text{ок}} = 0.36 R^2 - 0.3R^2 = 0.06 R^2$. Масса океана не превышала $0.1 M$, $h_0 = hM_0/0.06 R^2 = 1.6 h$ (6.5 км!). По-видимому, здесь такая оценка не совсем верна. Трудно представить, что мог образоваться такой глубокий океан, в то время как все материки были сушей. Поделим массу палеоокеана (4 млрд. лет) на всю поверхность Земли $0.36 R^2$, тогда $h_0 = hM_0/0.36 R^2 = 0.28 h$, или примерно 1 км. Таким образом, из модели горячей Земли следует, что большая часть материков находилась под водой, что соответствует геологическим данным.

Глубоководные желоба. Эти удивительные особенности строения океанического дна принято считать тем местом, где плита ныряет вглубь литосферы. Ранее предполагалось, что океанические осадки должны соскребаться в этом месте и заполнять желоба. Например, только в желобе Кермадек за последние 150 млн. лет должно было поглотиться 13 000 км литосферы (треть окружности Земли!). Можно себе представить, сколько здесь должно скопиться осадков. Как выяснилось, дно желобов, это обнаженные скальные породы без всяких осадков.

Океан Япетус. В тектонике плит принято считать, 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 Кэри (1991). Он тщательно анализирует все геологические и палеомагнитные данные и приходит к выводу, что этого мифического океана никогда на Земле не было.

Парадокс Мезервея. Meservey (1969) показал, что только на расширяющейся Земле можно получить согласие между современной топологией материков и океанов, и палеомагнитными данными, такими как, дрейф магнитных полюсов и полосовые магнитные аномалии в океанах. “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.

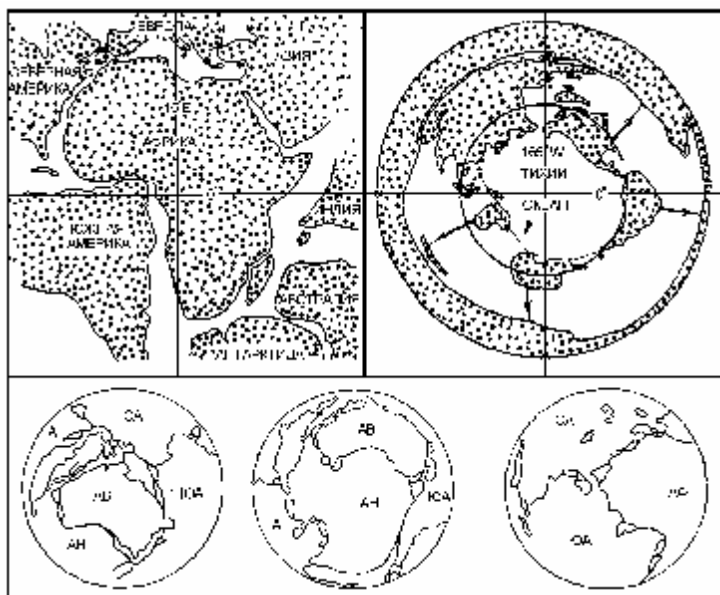


Рис. 7-6. Предполагаемое первоначальное расположение материков; экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления дрейфа материков, необходимые для получения исходной картины (Meservey, 1969). Расположение материков на шаре с радиусом внешнего ядра.

Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположенные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 7-6). Для того чтобы образовать Гондвану (рис. 7-6-а), этим материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным на рисунке 7-6-б, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеорекострукциям. Как показано многими авторами (Гораи, 1984; Кузнецов, 1990; Carey, 1976; Vogel, 1989), материки можно «уложить» один к другому практически без зазоров на шаре радиусом, точно равным радиусу внешнего ядра Земли (рис. 7-6-с). Для убедительного доказательства этого факта, доктор Фогель изготовил прозрачный глобус, внутри которого на шаре, эквивалентном шару внешнего ядра, располагались те же самые материки, что и на самом глобусе (Vogel, 1989). Глобус Фогеля демонстрирует, как изменялось положение материков, от начального, в момент образования Земли - до современного.

Парадокс Мезервея подтверждает нашу модель и оказывается непреодолимым препятствием для плитной тектоники. Геологические данные, имеющие отношение к геодинамике, в интерпретации противников плитной тектоники, скорее подтверждают нашу модель, чем ей противоречат. Наша модель с очевидностью решает проблему воды на Марсе и льда на Луне, привлекая к себе внимание научной общественности в

последнее время. Например, в декабре 1996 г. исследователи из НАСА сообщили, что ими получены свидетельства присутствия водяного льда в районе южного полюса Луны. Повторяем, что это остается неразрешимой загадкой для модели холодной Земли.

VII. 4. Парадокс в движении палеомагнитных полюсов.

Данные. Данные по местоположению виртуальных магнитных полюсов для различных материков и континентов, приводимые различными авторами для различных геологических эпох, довольно сильно различаются между собой. Различия настолько велики, что восстановление траекторий движения палеополюсов, а по ним - траекторий движения материков в геологическом прошлом, становится лишенным какого-либо смысла. Воспользуемся данными по дрейфу палеополюсов Северной и Южной Америки, Австралии и Африки за последние 240 млн. лет (Tarling, Abdeldayem, 1996). По-видимому, это наиболее достоверные данные. Наш выбор обосновывается тем, что профессор Д. Тарлинг является признанным специалистом по палеомагнетизму и автором известного учебника (Tarling, 1983).

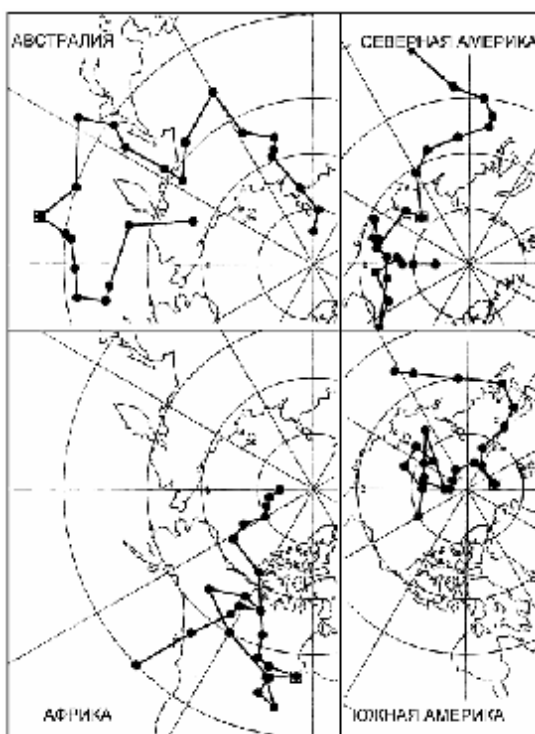


Рис. 7-7. Дрейф ВМП за (10 - 240) млн. лет определенных для Северной Америки, Африки, Австралии и Южной Америки. Прямоугольниками выделены “экскурсы-160” (Tarling, Abdeldayem; 1996).

На рис. 7-7 приведены траектории дрейфа палеомагнитных полюсов, определенных по данным, полученным с четырех континентов. Видно, что все зависимости обладают явным соответствием. Например, последние 60 млн. лет полюса дрейфовали по направлению к Северному полюсу практически вдоль меридианов. В более раннее время, характер движения полюсов был другим. Можно видеть, что здесь преобладающими направлениями дрейфа были долготные перемещения МП. На рис. 7-7 можно отметить одновременные (100, 200, 210 млн. лет назад) изменения характера дрейфа для всех четырех траекторий. Наиболее интересен резкий излом в точке, соответствующей 160 млн. лет тому назад. Это явление Тарлинг назвал “экскурсом - 160”, который характерен тем, что его “вектор” (см. рис. 7-7) обращен к тому континенту, где он фиксировался. В трех случаях из четырех (кроме Австралии) экскурс-160 имел направление в сторону

более высоких широт. Оценить по рисунку длительность «экскурса» не удалось, т.к. она примерно равна времени дискретизации (10 млн. лет).

Рассмотрим внимательнее направление дрейфа ВМП в течение последних 60 млн. лет, когда они дрейфовали в сторону более высоких широт и сравнительно немного отклонялись в долготном направлении. Наибольший интерес для нас представляют траектории дрейфа ВМП, определенные для Австралии и Южной Америки (рис. 7-8). В (Tarling, Abdeldayem, 1996) данные по дрейфу ВМП приводятся, начиная с 10 млн. лет назад. В принципе, мы можем продолжить эти траектории к современному моменту (0 млн. лет). Точка, в которой должны были бы наблюдаться ВМП, в настоящее время имеет координаты: 86°N , 185°E . На этом же рисунке показано местоположение СМП-94 и видно направление его дрейфа. Продолжая траекторию дрейфа СМП, мы также «встретимся» с этой точкой. Возможно, это не случайное совпадение, и эта точка является магнитным полюсом современной эпохи.

Отметим, что направление дрейфа ВМП Южной Америки ориентировано в сторону «своего» материка (где производились наблюдения). Совсем не так ведет себя ВМП Австралии: он дрейфует, удаляясь от «своего» континента (см. рис. 7-8). Обе траектории дрейфа параллельны и скорости дрейфа этих материков примерно равны. Легко показать, что этот парадоксальный факт противоречит современным представлениям.

Для доказательства этого, на рисунке 7-9 изобразим окружность, - сечение Земли плоскостью, ориентированной вдоль 120°E - 60°W меридиана (см. рис. 7-8 и 7-10). Обозначим местоположение Южной Америки - точкой «А», Австралии - точкой «В», современное положение полюса (географического и магнитного) - точкой «N». Так как нам неизвестно местоположение точки, в которой производились измерения ВМП, отнесем ее к «центру» материков.

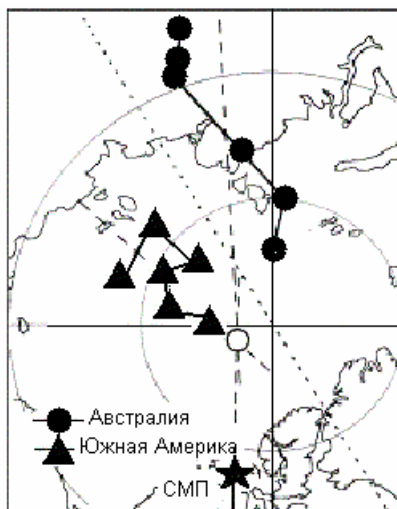


Рис. 7-8. Дрейф ВМП за последние 60 млн. лет. Звездочкой обозначено положение магнитного полюса 1994. Кружком обозначено положение ВМП при приведении траекторий дрейфа к современной эпохе.

Известно, что примерно 50 млн. лет тому назад Австралия отделилась от Антарктиды, 30 млн. лет тому назад она находилась примерно «на полпути» к современному положению (см. рис. 7-9). «Чуть позже» от Антарктиды отделилась Южная Америка. Оба материка дрейфовали на север (на нашей модели вверх рисунка). Австралия за 30 млн. лет продвинулась примерно на 13° (из точки В' в точку В), Южная Америка - примерно на 7° (из точки А' в точку А). Рисунок 7-8 показывает, что ВМП за это время переместился примерно на 10° [из точки N' в точку N]. Из рис. 7-9-а следует, что дрейф Австралии, по крайней мере, по направлению, «согласован» с перемещением магнитного полюса [перемещение материка из (·) В' → (·) В соответствует дрейфу МП из (·) N' → (·) N], в то время как движение Южной Америки находится в противоречии с ним [движение

материка из $(\cdot)A' \rightarrow (\cdot)A \sim (\cdot)N' \leftarrow (\cdot)N$]. Углы $OA'N_A$ и OAN' , а так же углы $OB'N_B$ и OBN' должны быть равны, но при этом точки N_A и N_B не совпадают с $(\cdot)N'$ (рис. 7-9-а). Полученный результат не находит объяснения с точки зрения тектоники плит, даже скорее, - ей противоречит.

Модель. Согласно модели “горячей” Земли, в процессе ее эволюции, радиус Земли возрастает, причем возрастание его происходит импульсно, а после каждого импульса расширения следует импульс сжатия. Таким образом, - эволюция “горячей” Земли происходит по “сценарию”, характерному для расширяющейся, пульсирующей Земли. За последние 50 млн. лет ее радиус увеличился примерно на 10 %. Надо сказать, что это весьма ориентировочная оценка. Дело в том, что теоретически оценить величину начального радиуса Земли, который заведомо был меньше современного, нет возможности. Модель “горячей” Земли представляется наиболее простой, изящной и самосогласованной в том случае, когда начальный радиус равен радиусу внешнего ядра. При этом оказывается, что Земля изначально была целиком покрыта материками, т.к. площадь поверхности материков точно равна площади поверхности внешнего ядра.

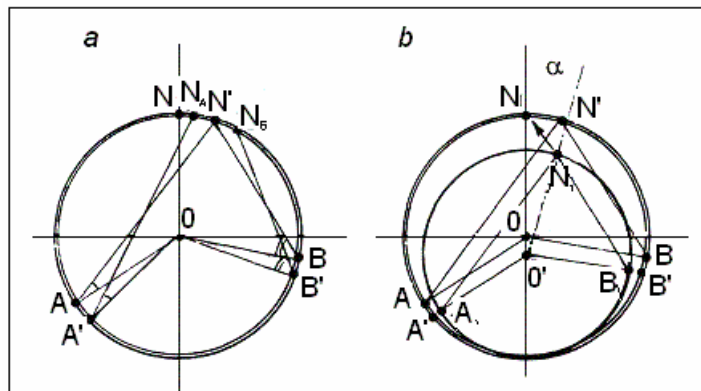


Рис. 7-9. Дрейф континентов и движение магнитных полюсов:

а - перемещение Южной Америки (А) и Австралии (В) и их совместного ВМП (N). (Точки: А, В и N - современное положение, точки: А', В' - 30 млн. лет назад). N_A и N_B - положения ВМП для точек А' и В'. ON - радиус Земли (const).

б - схема перемещения материков: A_1, B_1 и ВМП - N_1 , расположенных на радиусе O_1N_1 (меньшем чем ON). Угол α показывает поворот оси вращения Земли относительно Гондваны.

Согласно общепринятой точке зрения, Гондвана (Южная Америка, Антарктида и Австралия) 50 млн. лет тому назад представляла собой единый материк. На рис. 7-9-а, она занимает нижнюю часть круга. В Гондване на Южную Америку “приходится” примерно 65° долготы, на Антарктиду 45° и 30° на Австралию, итого, - 140° (при современном радиусе Земли). В настоящее время, с учетом того, что Гондвана была разорвана, и ее материка разошлись, это составляет уже 175° . Очень грубая (качественная) оценка величины радиуса Земли 50 млн. лет назад дает: $R_o \approx (145/175)R = 0.8 R$. По нашей модели, более точное значение $\approx 0.9 R$. Оценим величину R_o 30 млн. лет назад, несколько иным, но очень похожим способом. Современный угол АОВ (рис. 7-9) составляет 140° . Примем условие, согласно которому 30 млн. лет назад Южная Америка была соединена с Антарктидой (-7°). Австралия отстояла от нее примерно на 15° (см. рис. 7-9) или (-13°). Тогда величина угла $A'OB' \approx 120^\circ$. Как отмечалось, хорда длиной 120° на современном радиусе должна быть равна хорде в 140° на шаре радиусом R_o . Только в этом случае можно выполнить принятое нами ранее условие относительно того, что оба ВМП: Австралии и Южной Америки, «попадут» в одну точку (N_1 на рис 7-9-б). Отсюда следует, что величина $R_o \approx 120/140 = 0.85 R$. Точка А' переходит в $(\cdot)A_1$, а $(\cdot)B'$ переходит в $(\cdot)B_1$.

При этом мы выполняем очевидное условие: $A'B' = A_1V_1$. Кроме этого, треугольники AON и $A_1O_1N_1$, а так же BON и $B_1O_1N_1$ должны быть, и действительно оказываются, - подобными. Задача решена. При этом оказывается, что положение Гондваны относительно оси вращения Земли меняется на угол α . Мы рассмотрели один из самых простых вариантов, когда для обоих континентов МП находится в одной точке (N). Наша модель показывает, что нет проблем в решении других вариантов для случаев, когда МП не совпадают. Заметим, что идея оценки величины палеорадиуса Земли по палеомагнитным данным ранее неоднократно предлагалась и обсуждалась (Carey, 1976; Schmidt, Embleton, 1981; Scalera, 1990; Steiner, 1977; Van Hilten, 1963; Ward, 1963).

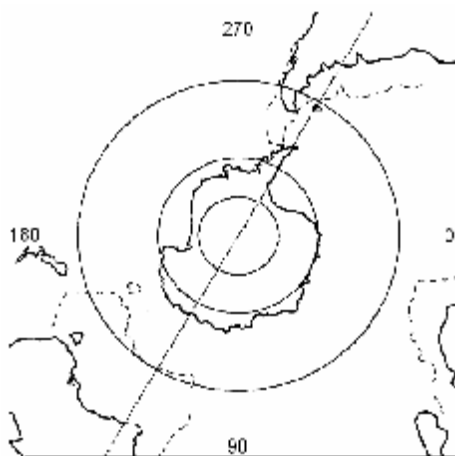


Рис. 7-10. Современное положение Австралии, Антарктиды, Южной Америки и Африки. Штриховой линией обозначено положение материков 30 млн. лет назад.

Выводы. Отмеченный нами факт дрейфа МП Австралии и Южной Америки в одном направлении и с одной и той же скоростью, не может найти объяснения с точки зрения современной тектоники плит, согласно которой полагается (и нигде не обосновывается), что радиус Земли не может изменяться, и он всегда был таким, как сейчас. По нашим (весьма приблизительным) оценкам, 30 млн. лет назад земной радиус составлял примерно 0.85 от современного. Это меньше, чем следует из модели (0.9). Ошибка вызвана, по-видимому, тем, что мы рассматривали только двумерную модель. Очевидно, что на таких простых моделях, даже если они несут в себе принципиально новый подход к решению проблемы восстановления положения материков в прошлом по палеомагнитным данным, полностью решить проблему, скорее всего, не удастся. Только трехмерная модель, поставленная на мощном компьютере, может продвинуть решение проблемы интерпретации дрейфа магнитных полюсов в настоящее время, в период инверсий и в геологическом прошлом.

Очевидным результатом расчетов с помощью такой программы могло бы быть получение уточненных сведений о величине земного радиуса в различное время эволюции Земли. Другим результатом работы такой программы, было бы выявление правдоподобных палеомагнитных данных. Последнее обстоятельство связано с тем, что (мы это отмечали) данные по положению ВМП у различных авторов очень сильно различаются. Имея в распоряжении такую программу, можно попытаться приблизиться и к самой главной цели - выяснению природы геомагнетизма.

Если мы правильно понимаем физику явлений, определяющих суть дрейфа МП на расширяющейся и пульсирующей Земле, то мы обязаны найти непротиворечивое объяснение явлению, названному нами "экскурс-160". Это явление, как видно из рис. 7-9, характерно для всех траекторий дрейфа МП. Как было показано выше, каждый вектор

“экскурса-160” направлен в сторону “своего” материка. Их величины по амплитуде примерно одинаковы. Какова причина этого удивительного явления? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к истории эволюции Земли.

Что произошло на Земле 160 млн. лет назад? Как следует из (Courtilot, Besse, 1987; Steiner, 1977) в этот период начался бурный рост океанов. Первым стал увеличиваться Тихий океан. Резко изменилась скорость дрейфа ТРВ, начался период мезозойских инверсий МПЗ. Этот период характерен тем, что именно от точки 160 млн. лет начинается отсчет начала регулярного спрединга.

Вполне естественно предположить, что 160 млн. лет назад на Земле произошло событие, связанное с началом её резкого расширения и возрастания объема и последующим его уменьшением - сжатием. Как можно видеть (см. рис. 7-11-б), при увеличении радиуса Земли, если растяжения и разрыва материка не происходит, то МП перемещается в сторону “своего” материка. Для того чтобы убедиться в этом, следует в точке В' изобразить угол $OB'N'$, равный углу OBN ($O_1B_1N_1$). Положение точки N' покажет направление и величину сдвига МП в цикле расширения. Очевидно, что в цикле сжатия МП “вернется” к своему прежнему положению. Таким образом, следуя нашей модели, 160 млн. лет назад на Земле начался, по-видимому, один из самых значительных циклов “расширение-сжатие”, положивший начало ее интенсивному расширению. Именно в это время закончился Юрский суперхрон и наступил период мезозойских инверсий. По нашей модели – в это время произошла перестройка конвективной системы внешнего ядра, началось быстрое охлаждение вещества внутреннего ядра, процессы конденсации его вещества стали протекать более интенсивно, что привело к резкому росту мантии и, как следствие этого, расширению Земли и росту океанов.

VII. 5. Срединг и субдукция в модели горячей Земли.

Как известно, 80-90 % землетрясений на Земле происходят в областях, называемых зонами субдукции, областях, расположенных, в своей значительной части, по окраинам Тихого океана. Зоны субдукции находят не только в океане, например, к ним относят Карпаты, Гималаи и Апеннины и т.п. Как следует из плитной модели, в этих зонах плита “ныряет” в литосферу, с той целью, чтобы вновь “появиться” на поверхности Земли в зонах спрединга. Эта идея общепринята большинством геологов Мира, хотя даже не очень внимательный взгляд позволяет выявить многие несоответствия этой модели наблюдениям. Во-первых, казалось бы, сейсмичность Земли должна была бы делиться примерно поровну между зонами субдукции и зонами спрединга. Ведь эти процессы - “стороны одной медали”. На самом деле, это совсем не так. Легко убедиться в том, что сейсмичность зон спрединга ничтожна по сравнению с сейсмичностью зон субдукции. Во-вторых, согласно постулатам тектоники плит, 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 на северо-востоке Тихого океана. В третьих, скорости движения плит в зонах субдукции составляют, по порядку величины, до десяти см в год, а направление их движения подчас совпадает с направлением, следующим из тектоники плит. Однако подобного явления нет и в помине в районе зон спрединга. Палеоследы такого дрейфа есть, это хорошо изученные полосовые магнитные аномалии, но в настоящее время спрединг, как механизм формирования земной коры и литосферы, “выключился и не работает”. Имеются данные, что последний раз спрединг “включался” с 20 до 12 тысяч лет тому назад, во время последнего экскурса магнитного поля Земли, а в течение последних 12 тыс. лет, он был “выключен”. Почему плита в Тихом океане движется со скоростью 10 см/год, хотя таких скоростей не фиксируется в зонах спрединга? Должен ли соблюдаться баланс между количеством вещества, генерируемого в зонах спрединга и поглощаемого в зонах субдукции? На многие из подобных вопросов плитная тектоника не находит ответов. Рассмотрим, может ли ответить на них наша модель горячей Земли.

Строение Земли. В начале этой главы мы обсуждали конвекцию во внешнем ядре. Действительно, иначе как наличием периодической конвекции невозможно объяснить данные по *splitting*-функциям для внешнего ядра. Совсем другая картина при визуализации внутреннего строения с помощью этих функций, наблюдается для мантии и внутреннего ядра. Причем, что необходимо отметить, картина *splitting*-функций внутреннего ядра идентична аналогичным функциям, построенным для мантии (см. Главу III). Как мы отмечали в Главе III, картина, показывающая строение Земли становится ещё интереснее, если построить на ней распределение высот геоида (см. рис. 3.16–а, где показан “срез” по экватору: анизотропии внутреннего ядра, анизотропии сейсмических свойств мантии и высоты геоида, и рис. 3-16-б то же 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.

Причина именно такого строения Земли, в рамках нашей модели, заключается в том, что фазовый переход, который происходит на границе внутреннего ядра, наиболее интенсивен в областях раскрытия океанов: Тихого (120° Е - 255° Е) и Атлантического (315° Е - 15° Е). Речь идет о двумерных картинках, регистрируемых в плоскости экватора и меридианов Земли. Именно в этих областях интенсивного фазового перехода происходит разуплотнение вещества внутреннего ядра и должно наблюдаться уменьшение плотности и скорости Р-волн, т.к. известно, что на границе G-ядра скорость этих волн 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 (Глава III), должна уменьшаться в процессе эволюции Земли. Возможно, именно 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, иначе, зоны субдукции.

Спрединг. Спрединг логично следует из нашей модели - модели расширяющейся Земли. Собственно спрединг является “инструментом” её расширения. Как мы отмечали в предыдущих главах, радиус внешнего ядра, в рамках нашей модели, остается неизменным. На его границе реализуется кристаллизация вещества мантии, “излишки” которого, либо путем регулярного спрединга, либо путем образования плюмов, “сбрасываются”, попадают в область земной коры и приводят к увеличению её поверхности. В течение последних 200 млн. лет увеличивается в основном поверхность океанов. Ранее мы выделяли два типа расширения: “тихоокеанический” и “атлантический” (Кузнецов, 1990). В этом параграфе мы иллюстрируем их различия на примере анализа полосовых магнитных аномалий. Будем использовать карты осей палеомагнитных аномалий мирового океана (Карта .., 1981) и карту плитной тектоники района Тихого океана (Plate-tectonic map, 1985).

Беглый взгляд на характер раздвижения материков позволяет 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 древнего

материка, в зоне раскола стал действовать механизм спрединга в зоне срединно-океанического хребта, возникла астеносферная зона, с толщиной h убывающей с расстоянием от срединно-океанического хребта как: $h \sim t^{1/2}$. Нарастивание океанической коры в зоне срединно-океанического хребта (СОХ) сопровождалось постепенным отодвиганием материков друг от друга (по стрелкам). В образованной океанической коре атлантического типа можно выделить: инверсии и соответствующие им полосовые магнитные аномалии последних 80 млн. лет; зона мелового суперхрона (80-120 млн. лет назад); затем зона мезозойских инверсий (120 - 160) и, наконец, зона спокойного поля юрского суперхрона (см. рис 7-11-а).

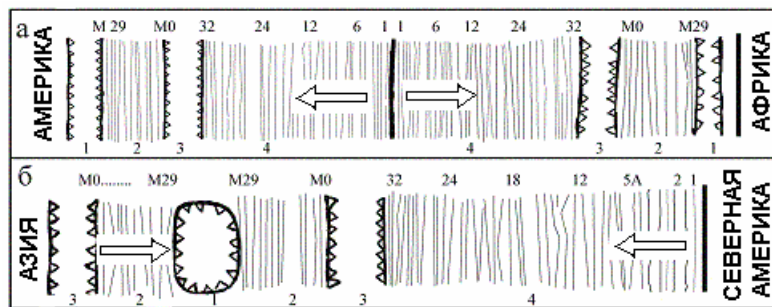


Рис. 7-11. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океана (б) по данным о полосовых магнитных аномалиях, где выделяются зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 - «современных» аномалий. Стрелки показывают направление дрейфа.

Совсем иначе наращивалась океаническая кора в западной части Тихого океана. Здесь реализовывался т.н. “тихоокеанический” тип наращивания океанической коры. Его суть, в отличие от атлантического, заключается в том, что первоначально в океане наращивалась зона, соответствующая юрскому суперхрону. Вокруг неё расположена зона мезозойских инверсий, далее следует - она мелового суперхрона (в виде «полумесяца») и, наконец, зона инверсий “последних” 80 млн. лет (см. рис 7-11-б и 7-12). Рисунок 7-12 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация 7.12-1 (см. рис. 1-3) соответствует началу расширения Земли, росту мантии, разрастания океанов и образования юрской зоны “свободного поля” (ориентировочно 300 - 200 млн. лет тому назад).

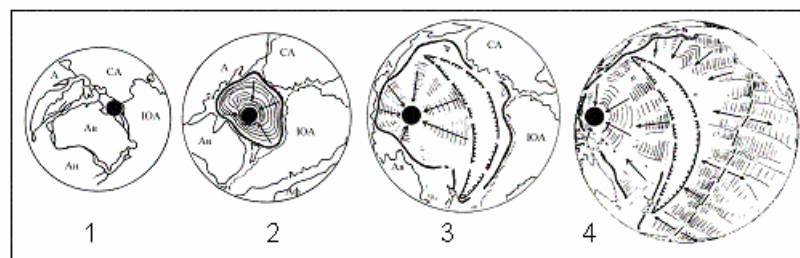


Рис. 7-12. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Черный круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловой суперплюм; жирная линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

Второй этап (рис. 7-12-2) эволюции связан с мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий (рис. 7-12-3) - с возникновением мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний рисунок (рис. 7-14-4) показывает современную ситуацию. Складывается впечатление, что спрединг в восточной части Тихого океана, на начальном

этапе (рис. 7-12-1) представлял собой расширяющуюся «трубу», действие которой постепенно прекращалось со временем эволюции. Окончание работы этого этапа спрединга приходится на точку в Тихом океане, граничащую с Австралией. Срединг постепенно затухал, «перемещаясь» от этой точки по часовой стрелке примерно до современного Ванкувера, где около 40 - 50 млн. лет тому назад образовался и начал функционировать срединно-океанический хребет (СОХ), подобный Атлантическому. Можно видеть, что Тихий океан раскрывался, формируя своеобразную спираль Архимеда, чем-то напоминающую раковину улитки.

Отметим, что зона юрского суперплюма соответствует Тихоокеаническому поднятию и практически совпадает с максимальной на Земле высотой геоида. Вторая область поднятия геоида соответствует центральной части Атлантического СОХ.

Обратим внимание на характер спрединга, связывающий глубину астеносферной зоны h и время эволюции t . Принято считать, что в зонах спрединга: $h(\text{км}) \approx 10 t^{1/2}$ (млн. лет). Сравним эту зависимость, с полученной нами ранее (в Главе III) аналогичной зависимостью глубины h для Земли в целом: $h = 100 t^{1/2}$. Аналогичную зависимость можно построить для астеносферы в районе Байкала: $h = 1.8 t^{1/2}$ 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. Радиус Земли изменялся следующим образом: $R \sim t^2$, а глубина астеносферы: $h \sim t^{1/2}$. Различные коэффициенты перед $t^{1/2}$ показывают лишь “долю” каждого “участника” в этом процессе.

Субдукция. Механизм спрединга, связанный с образованием СОХ и разрастанием дна океанов, более или менее понятен в рамках нашей модели. В то же время такое явление как субдукция, несмотря на то, что появились сообщения о новой геологической специальности - “субдуктология”, остается “темным местом” в физике Земли.

Надо сказать, что зоны субдукции усиленно изучаются, и в последнее время в печати появились весьма интересные результаты изучения. Их осмысление позволяет предложить принципиально новую модель субдукции. Однако прежде чем перейти к этому вопросу, упомянем ряд оригинальных исследований зоны субдукции, имеющих, по нашему мнению, отношение к проблеме.

Данные. В последние годы, в область космической геодезии, в дополнение к системам лазерной локации спутников (LAGEOS) и дальнотазовой 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, что тектонические модели, в ряде случаев, 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.

Высота геоида. В правом нижнем углу на карте северо-западной части Тихого океана (см. рис. 7-13) находится область ($180^\circ; 0^\circ$), характеризующаяся максимальной высотой геоида (Lewis, Smith, 1998), достигающей +60 и более метров. Это наибольшее на Земле положительное отклонение высоты геоида, второе аналогичное, положительное отклонение находится на противоположной стороне Земли, - на экваторе и нулевом меридиане. В области коллизии, вдоль побережья Тихого океана, проходит линия нулевой высоты геоида. Дальше на запад высота геоида понижается до максимального значения в

районе Индостана (90° E-меридиан), после чего уровень геоида вновь повышается до Гринвича и затем понижается до 90° W-меридиана. Таким образом, высота геоида, если рассматривать её вдоль экватора, имеет два максимума и два минимума, отстоящих друг от друга почти строго на 90° (см. рис. 3-16).

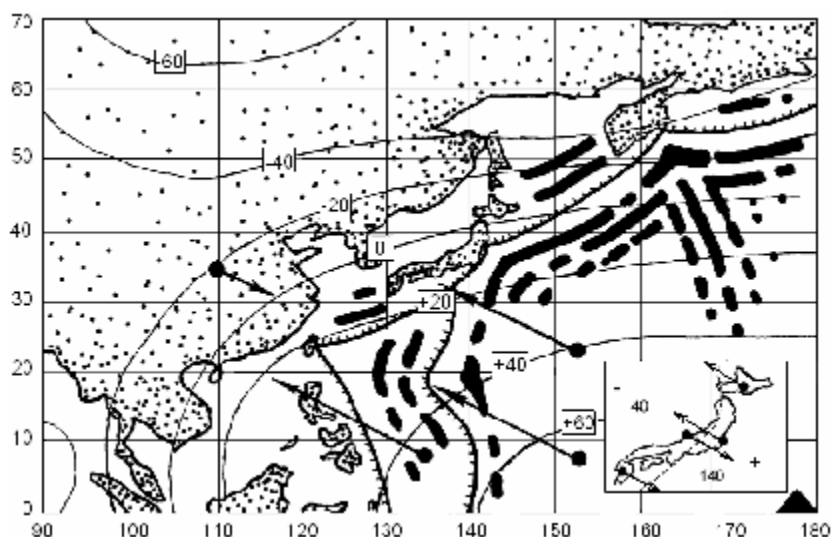


Рис. 7-13. Карта высот геоида (цифры в квадратах - метры), гравитационных аномалий (черные полосы), направлений (стрелки) и величин дрейфа (длина стрелок) материков и плит (Lewis, Smith, 1998; Маслов, 1988; Kato, et al. 1998). Черный треугольник внизу справа показывает положение точки с максимальным значением высоты геоида. В правом нижнем углу рисунка (вставка) показаны направления скоростей дрейфа литосферы, измеренные в Японии с помощью GPS-системы (Imakire, 2000). Штриховая линия, это линия геодинамического равновесия (аттрактор). При достижении равновесия встречные скорости дрейфа равны нулю.

Скорости дрейфа. Дрейф Тихоокеанической плиты, обладающий максимально большими скоростями (до 10 и более см. в год), направлен вдоль градиента геоида (Kato et al., 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 (Kato et al., 1998) 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 в направлении большей его высоты (рис. 7-13).

На вставке, в правом нижнем углу рисунка 7-13, - приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии (Imakire, 2000). Рисунок 7-13 показывает, 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 так, как будто он находится на Азиатской плите ((Imakire, 2000). 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 7-13. 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 совсем точно соответствует нулевой отметке высоты геоида.

Сделаем оценки вертикальных перемещений плит в области максимальных величин высот геоида. Это понадобится в дальнейшем при обсуждении модели горизонтального переноса земной коры. Как показал Маслов (1988), одному метру высоты геоида (при вязкости материала плиты порядка 10^{24} Пз) соответствует скорость изменения его высоты, равная 0.002 мм/год. Если использовать эту оценку для точки с максимальной величиной высоты геоида (примем её равной 50 м), то окажется, что скорость вертикального перемещения здесь, порядка 10^{-2} см/год, что в 1000 раз меньше чем скорость горизонтального переноса. Рассмотрим физику растекания капли жидкости, как возможную аналогию рассматриваемым процессам дрейфа материков.

Модель растекающейся капли. Очевидно, что физика “растекающейся капли” не может иметь прямой аналогии с процессами, связанными с субдукцией. Тем не менее, такая аналогия иллюстрирует некоторые характерные моменты нашей модели. 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 a , капиллярная постоянная $a = (2a/gr)^{1/2}$, g - сила тяжести, r - плотность жидкости. Объем капли $2/3\pi H^3$, объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана $\pi R^2 d$. Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим Q , 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 :

$$\Delta p = a(1/X_1 + 1/X_2).$$

При условии, что поверхность жидкости плоская, иначе: $X_1 = X_2 = \infty$, $\Delta p = 0$.

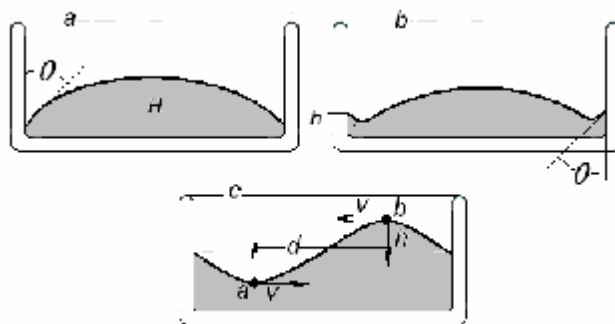


Рис. 7-14. Модель растекающейся капли.

Очевидно, что скорость растекания вещества капли, т.е. скорость перемещения фронта жидкости вдоль поверхности дна стакана $v_R = dR/dt$ намного больше скорости уменьшения высоты капли $v_H = dH/dt$: т.е. $dR/dH \sim H/R$. При растекании капли на границе жидкости с поверхностью дна и окружающем воздухом возникают три силы: сила растекания, сила трения и сила поверхностного натяжения. Эти силы не уравновешены и для их равновесия возникает сила направленная вертикально вверх. Эта сила заставляет тонкую пленку, на которой находится растекающаяся капля, загибаться вверх, как бы обворачивая каплю. Именно эта сила заставляет жидкость подниматься вверх на высоту h около стенки сосуда:

$$h = a(1 - \sin q)^{1/2}. \tag{7.12}$$

Растекание капли вызывает появление капиллярных волн при условии: $k \lesssim 1/a$, где k - волновое число. Частота капиллярных волн $\omega^2 = (a/r) k^3$ (Ландау, Лифшиц, 1986).

Гравитационные аномалии. Обратимся к геодинамической карте американской организации Energy and Mineral Resources (Plate-tectonic map, 1985). На ней, в районах Курильского и Алеутского желобов изображены протяженные аномалии силы тяжести, представляющие собой периодические структуры, с характерным поперечным размером («длиной волны») порядка 200 - 400 км. Амплитуда этих аномалий «затухает» на расстоянии порядка 1000 км от желобов (см. рис. 7-13). Картина гравитационных аномалий, как отмечал Маслов (1988), напоминает эффект интерференции волн, «набегающих» и отраженных от желобов. Он же обратил внимание на то, что аналогичная волновая картина наблюдается и на восточной границе плиты Наска, т.е. в прямо противоположном направлении от Курильской дуги.

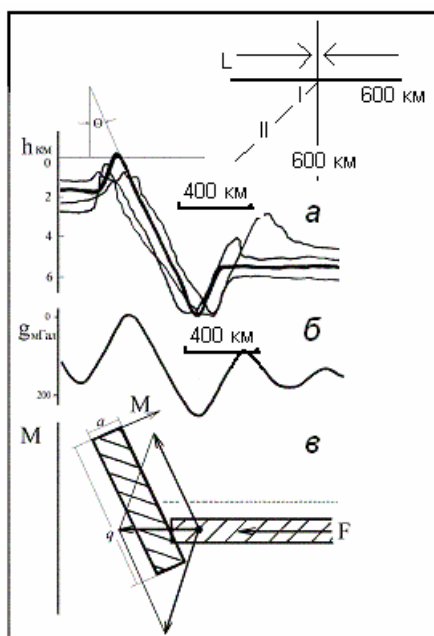


Рис. 7-15. Субдукция: *a* – рельеф (Harabaglia, Doglioni, 1998); *б* - гравитационные аномалии (Маслов, 1988); *в* – механическая модель. Вверху справа схема субдукции и три области сейсмичности и вулканизма.

Структура зон субдукции. 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, 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. 7-16-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. 7-15-б представлено изменение силы тяжести вдоль профиля зоны. Отметим, что во всех 20-ти зонах субдукции, о которых идет речь, их параметры практически идентичны и отличаются друг от друга в весьма незначительных (на наш взгляд) деталях.

Модель субдукции. Согласно действию принципа минимизации гравитационного потенциала, Земля в течение своей эволюции стремилась минимизировать площадь своей поверхности. Это, в конкретном случае, может означать, что на поверхности Земли всегда

есть сила, которая стремится привести её в состояние гидростатического равновесия, а форму Земли, - к равновесной форме сфероида. Иначе, эта сила стремится минимизировать высоту геоида. По-видимому, такую силу можно формально уподобить силе поверхностного натяжения жидкости и при определении параметров литосферы в зонах субдукции, воспользоваться формулами, выведенными для оценок капиллярных эффектов.

По данным, приведенными на рис. 7-15-а, оценим высоту h и величину краевого угла Q . Высота h составляет 6 - 8 км, а угол Q порядка 85 - 87°. Используя формулу 7.12, оценим величину a : $a \approx 500 - 1000$ км, и воспользовавшись формулой:

$$a = (2a/gr)^{1/2}, \quad (7.13)$$

оценим величину “поверхностного натяжения” a : $a \approx 10^{19}$ дин/см. (Для сравнения, a воды 70 дин/см).

Для Тихого океана $R \approx 5$ тыс. км, высота “капли” H равна примерно 50 м (высота геоида), поэтому отношение $H/R \approx 10^{-5}$. Скорости “растекания” поверхности Тихоокеанической плиты ($v \approx 10$ см/год) соответствует скорость убывания высоты геоида $dH/dt \approx 10^{-3}$ мм/год. Это означает, что собственно “течет” только самый верхний и сравнительно тонкий слой литосферы. Оценим его толщину, для чего воспользуемся формулой (Ландау, Лифшиц, 1986):

$$hv \sim -z(da/dx), \quad (7.14)$$

где h вязкость вещества слоя литосферы ($h \approx 10^{24}$ Пз), $v = 10^{-7}$ см/с, z - толщина слоя, da/dx - изменение поверхностного натяжения вдоль слоя. Напомним, что величина $a = 10^{19}$ дин/см, разумно предположить, что она может изменяться на 1 % на длине порядка 100 км, т.е. $da/dx \approx 10^{10} - 10^{11}$ дин/см². Отсюда следует ориентировочная оценка $z \approx 10 - 100$ км.

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

$$\Delta g = 2\pi Gf\Delta\rho. \quad (7.15)$$

Возмущение силы тяжести в зоне субдукции порядка 100 мГал (см. рис. 7-15-б), изменение плотности принято считать в таких оценках, порядка 0.2 г/см³, толщина возмущающего слоя оказывается: $f \approx 40$ 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).

Использование капиллярной аналогии 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 нами выше, 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.

С этих позиций рассмотрим и картину взаимодействия «волн», приводящих к их интерференции при отражении от преграды в виде желоба. Как мы отмечали, длина «волны» порядка 200 - 400 км, следовательно, величина $k = (0.2 - 0.5) 10^{-7}$ см⁻¹ соизмерима с $1/a = (1 - 2) 10^{-8}$ см⁻¹, что говорит о необходимости учета капиллярных явлений. Частота капиллярных волн: $w^2 = (a/r) k^3$: $w \approx 10^{-2}$ с⁻¹, или, если учесть, что длина волны ≈ 400 км, а скорость сейсмических волн $v_p \approx 4$ км/с, то величина w оказывается того же порядка. При всей внешней “похожести” картины гравитационных аномалий в зонах субдукции,

интерференции капиллярных волн, эта модель абсолютно нереальна, т.к. нет никаких оснований, считать, что, хоть и капиллярные, но всё равно акустические волны, способны создать вариации плотности в литосфере, соответствующие $\Delta g = 100$ мГал.

Более реалистичная оценка эффекта может получиться, если в модели иметь ввиду гидродинамические волны, возникающие 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 (см. рис.7-13).

Скорость горизонтального течения литосферы (Маслов, 1988) v_x :

$$v_x = rg^2 / (8\pi m G D r T) \int_A^B N(x) dx,$$

где r - плотность слоя, Dr - разность между плотностью вещества слоя и плотностью земной коры, g - сила тяжести, m - вязкость вещества слоя, G - гравитационная постоянная, T - толщина слоя, $N(x)$ - высота геоида на расстоянии x между точками А и В. Упрощая и подставляя привычные значения величин, получаем для v_x : $v_x \approx 0.1 N$ см/год (где N в метрах). Эта оценка дает верный результат для скоростей течения литосферы. Отношение скорости вертикального перемещения v_z к $v_x \approx 10^{-5}$.

Можно ли найти другую причину, объясняющую характер гравитационных аномалий в зонах субдукции? Для того чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим явления, происходящие в этих зонах, с другой позиции, не в рамках гидродинамики, как раньше, а с позиции 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 7-15-в). К торцу «балки» приложена внешняя сила, которая, собственно, и вызывает её 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:

$$M = 1/2 g q^2 h a r. \quad (7.16)$$

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»), $W = 1/2 q h a$. 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 уравнением:

$$d^2 w(x)/dx^2 = M(x)/EJ - S w(x)/EJ, \quad (7.17)$$

где E - модуль Юнга, J - момент инерции балки. Решение этого уравнения имеет синусоидальный, волновой характер, который, возможно даже в большей степени, чем интерференция акустических, капиллярных или гидродинамических волн, соответствует наблюдаемой картине гравитационных аномалий зон субдукции.

Обсуждение. Основной вывод, следующий из нашей модели субдукции, состоит в том, что движение материков и плит в этой области обязано «растеканию» литосферы. Крутопадающая в сторону материка область желоба, характеризуемая как астеносферная область пониженных сейсмических скоростей и как сосредоточение глубинных землетрясений и «корней» вулканов, представляет собой давно прекративший существование, «потухший» тихоокеанический спрединг. Напряжения, обязанные растеканию литосферы и влиянию изгибающего момента сил, связанного с образованием в зоне желоба наклоненной «балки», приводят к активизации сейсмичности и вулканизма. В этой области астеносферы, во всех зонах субдукции, фиксируется понижение величины силы тяжести. Наша модель, в принципе, находит объяснение многим особенностям, фиксируемым в зонах субдукции, без привлечения глобальной конвекции.

Второй, не менее важный вывод, следующий из нашей модели, заключается в том, что постулируемой в плитной тектонике глобальной конвекции в мантии, нет, и не может быть на Земле. Это совсем не означает, что конвекции нет, и не может быть вовсе. Конвекция в мантии существует, но это турбулентная, мелкомасштабная конвекция, которая не может служить двигателем материков и плит. Основанием для такого заключения служат несколько соображений. Например, одно из них состоит в том, что Земля негидростатична, так как иначе, Земля имела бы сжатие, равное $1/232$, а не $1/298$, как есть на самом деле. Последняя цифра говорит о том, что интегральная жесткость мантии, близкая к жесткости стали, не разрешает 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.

Третий вывод, следующий из нашей модели очевиден: Если спрединг на Земле существует, а глобальной конвекции и субдукции нет, то Земля обязана расширяться. То, что сегодня расширение Земли инструментально не фиксируется, вовсе не говорит о его принципиальной невозможности в процессе эволюции Земли. Как мы отмечали, в настоящее время спрединга нет, нет расширения, наоборот, - инструментально фиксируется скорее сжатие Земли. Она стремится занять форму сфероида, что и является причиной «растекания» литосферы.

Модель субдукции базируется на принципе минимизации гравитационной энергии и его физическом воплощении - минимизации высоты геоида. Действительно, если сравнить высоту гор Земли с её радиусом H/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 $x/R \approx 10^{-5}$. Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать не высоту рельефа, не величину гравитационных аномалий, а высоту геоида.

Таким образом, Земля стремится принять форму сфероида, а если не учитывать эффектов вращения, то шара. К аналогичной цели «стремится» капля жидкости вне сил гравитации. Эта аналогия позволила нам ввести новое понятие в физике Земли – поверхностное натяжение литосферы и оценить его величину. Какова физика этого явления? Очевидно, что здесь уже нельзя использовать аналогию с молекулярными силами, действующими в жидкой капле. В нашем случае должны быть силы, обеспечивающие “дальний порядок” этому явлению, только в этом случае в литосфере Земли могут проявляться эффекты, подобные поверхностному натяжению. В качестве таких сил могут быть силы гравитации и вращения. Именно они действуют на все компоненты литосферы, заставляя её проявлять коллективные свойства, подобные молекулярным.

Предлагая модель субдукции, мы, естественно, рассмотрели и спрединг, причем при анализе этого, казалось бы, хорошо известного явления, выяснилась интересная деталь, касающаяся эволюции Тихого океана. В отличие от линейного и симметричного атлантического спрединга, в Тихом океане спрединг представлял собой по началу

расширяющуюся со временем “трубу”, по стенкам которой происходил подъем вещества в течение юрского и мезозойского периодов. Эта “труба” была впоследствии разорвана и развернута в структуру, напоминающую спираль Архимеда (рис.7-12). Примерно 60-80 млн. лет назад этот “цилиндрический” спрединг в Тихом океане прекратился и начался линейный и симметричный, аналогичный - атлантическому. При разворачивании “цилиндрического” спрединга, как результат расширения океанического дна, образовались т.н. окраинные дуги и желоба. Эти остатки, следы древнего спрединга, и называются зонами субдукции.

Как отмечалось, формирование Тихого океана начиналось с растяжения коры и мантии и образования разломов-рифтов, одним из которых был и Байкальский рифт. Эти события происходили, по-видимому, раньше, чем 200 млн. лет назад, когда начиналось формирование современных океанов. Толщина мантии (согласно нашей модели горячей Земли) в тот период была значительно меньше современной. Растяжение литосферы сопровождалось не только образованием Байкальского рифта но, возможно, и некоторым “течением” - перемещением его восточной части относительно западной. Такое течение должно было быть связано с нагревом определенной области мантии и возникновением астеносферы. Вполне возможно, что астеносферная зона, обнаруженная группой С.В. Крылова под Байкалом, это последствие явлений растяжения литосферы в верхней мантии, и её “отображение” в нижней. Надо заметить, что результат, полученный группой С.В. Крылова уникален. Насколько мне известно, таких подробных исследований рифтовых зон никто никогда не проводил. Полученный результат ещё раз убеждает в справедливости нашей модели геодинамических процессов на Земле.

Надо заметить, что значительно раньше Чудинов (1981), отрицая идею субдукции, как затягивание плиты в мантию, предложил в качестве альтернативы эдукцию, как механизм выноса материала на поверхность Земли (спрединг?) из мантии. Его идея согласуется с нашим выводом: Зоны субдукции, - это “следы” угасшего спрединга. Глубоководные желоба, - это наиболее глубокие “шрамы” на поверхности Земли. В настоящее время Земля “залечивает” эти “шрамы”. Современная геодинамика, сейсмичность и вулканизм, это средства процесса такого “залечивания”.

VII. 6. Течение литосферы и образование гор.

«Волновую картину», возникшую в литосфере, и несколько напоминающую ситуацию в зоне субдукции описанную выше, можно выявить, если обратиться к схеме горных районов центральной Азии, таких как Тибет, Тянь Шань и Алтай (рис. 7-16-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. 7-16-б). Рис. 7-16-а показывает, что характерные размеры «волновой картины» превышают размеры, следующие из похожей «картины» в зоне субдукции в несколько раз, высоты гор h и величины краевых углов q так же выше и, более того, различны для различных горных районов.

Воспользовавшись формулой (7.13) можно оценить величину капиллярной постоянной a и, вслед за этим, величину «поверхностного натяжения» a (по формуле: $a = (2a/gr)^{1/2}$). Рисунок 7-16-с показывает, что и величина a , 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. 7-16-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.

7-16-а и 7-16-d, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы.

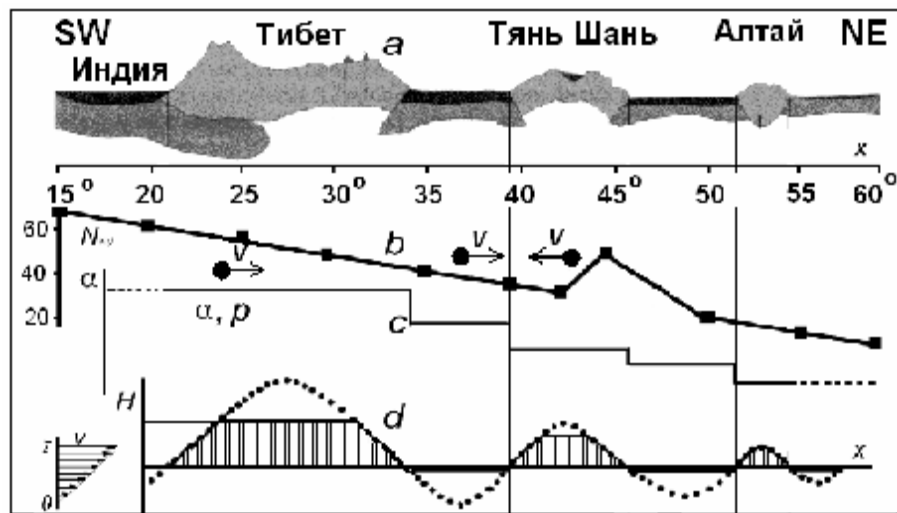


Рис. 7-16. Схема горных районов центральной Азии (рис. а) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N – в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (b) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы α и величины сдвигового (лаплассового) давления ρ вдоль профиля (c). Модельные представления (d).

Предположим, что кривая, отображенная на рис. 7-16-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:

$$ds/dt = dp/dt - v_0. \quad (7.18)$$

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

$$m(\ddot{p}/t^2) + j(dp/dt - v_0) + kp = 0. \quad (7.19)$$

Следуя книге Дж. Стокера (Стокер, 1952), введем новую переменную x , заменив p при помощи соотношения:

$$x = p + 1/k(-v_0). \quad (7.20)$$

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. 7-16-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 7-17-d, можно записать в виде:

$$m \ddot{x} + F(dx/dt) + kx = 0, \quad (7.21)$$

где

$$F(dx/dt) = j (dx/dt - v_0) - j (- v_0) \quad (7.22)$$

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

VII. 7. Высота гор.

Наличие гор на Земле, казалось бы, должно находиться в противоречии с Принципом минимизации гравитационной энергии. 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 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 .

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° – 100°E (см. рис. 7-18). 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. 7-17 внизу слева). На рис. 7-17 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) $D_H \approx - 0.9$.

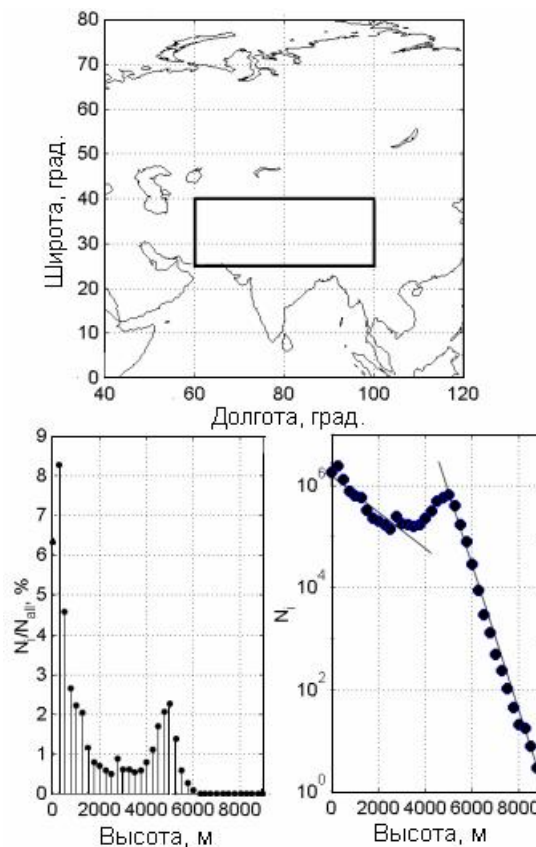


Рис. 7-17. Высота гор. Вверху – исследуемый регион. Слева внизу – гистограмма N/N . Справа внизу зависимость $\lg N - \lg H$ (N – число гор, H – их высота).

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. 7-17, 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. $H = a(1 - \sin q)^{1/2}$ 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:

$H = a(1 - \sin q)/s$. 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:

$(1 - \sin q) = 10^{-4}$, или $q \rightarrow 90^\circ$, что соответствует: $a \gg H$.

VII. 8. 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).

Как было выяснено, плюмы – мантийные струи пронизывают мантию от границы ядра до поверхности Земли. При выходе на поверхность они изливаются базальтами малой вязкости – трапшами. 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.

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 проплавив её. Положим, что минимальное сечение плюма не должно быть меньше, чем 10×10 км², толщина мантии 3000 км, скрытая теплота плавления $U = 1$ кДж/г, плотность вещества мантии $\rho = 4$ г/см³. Тепловая энергия $Q = \rho VU$, где V – объём вещества мантии, участвующего в прохождении плюма, $\approx 3 \cdot 10^{20}$ см³, а $Q \approx 10^{24}$ Дж, что примерно соответствует тепловому потоку Земли ($\approx 10^{21}$ Дж/год) за тысячу лет. Откуда может взяться энергия такой величины, необходимая для прохождения всего лишь одного плюма, - современная модель холодной Земли ответа не даёт.

Представим себе, что плюм «вышел» на материковую поверхность Земли в районе береговой линии (рис. 7-18-1). В момент выхода плюма растягивающие силы направлены вверх (рис. 7-18-2). Уровень океана (точка) при этом понижается (квадрат), - это явление получило название регрессия. Следующим этапом по окончанию цикла расширения, связанного с плюмом, происходит цикл сжатия Земли гравитационными силами (рис. 7-18-3). При этом уровень океана возрастает и становится выше изначального, - это трансгрессия.

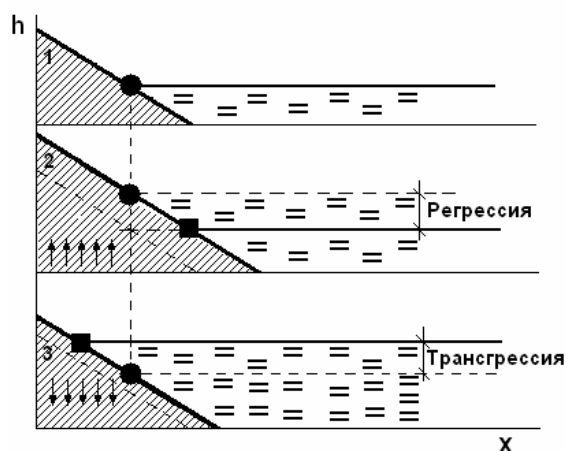


Рис. 7-18. Выход плюма на поверхность Земли и связанные с этим трансгрессии и регрессии.

Итак, временные этапы последовательного развития плюма включают (рис. 7-18):

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.
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 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. 7-19-а) можно выделить два из них. Это образовавшийся в период 120-80 млн. лет назад Меловой суперплюм – зона спокойного геомагнитного поля (3 - на рис.7-19-а). 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. 7-19-*b*, 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.

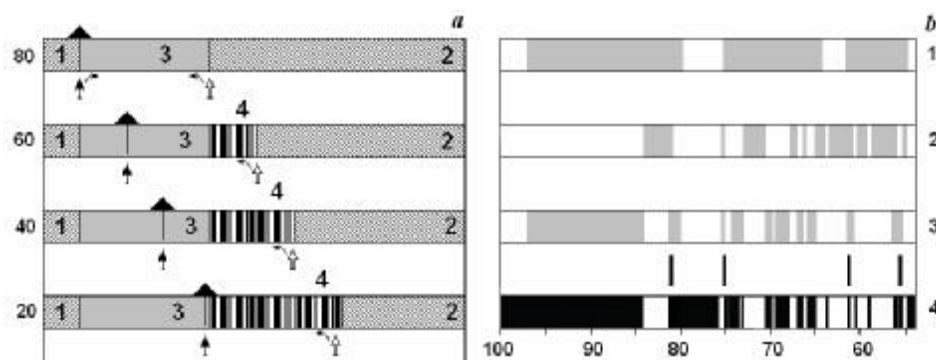


Рис. 7-19. Плюмы и суперплюмы. Перемещение «горячей точки» - *a*. 1 – Азия, 2 – Америка, 3 – меловой суперплюм, 4 – зона инверсий. Цифры слева – время в млн. лет, черная стрелка и треугольник – «горячая точка», белая стрелка – СОХ. Модель «дробления» суперплюма - *b*: 1 – суперплюмы, 2 – периоды «работы» СОХ, 3 – плюмы и суперплюм, 4 – шкала инверсий.

VII. 9. Геодинамика и фундаментальные характеристики Земли.

Как известно, эксперимент - критерий истины. Любая модель строения Земли должна удовлетворять известным и неоднократно проверенным экспериментальным данным и её фундаментальным характеристикам. Такие характеристики Земли, как величина её радиуса и скорость его изменения; величина сжатия и изменение его с течением времени; сила тяжести и её изменение, скорость вращения, высота геоида, главные центральные моменты инерции и т.п., далеко не полный перечень фундаментальных характеристик Земли. Эти параметры и характеристики определяются геодезическими методами и составляют основу геодезии как науки. Если модель внутреннего устройства Земли противоречит её фундаментальным характеристикам, вероятнее всего то, что эта модель неверна.

Как следует из нашей модели горячей Земли, она в процессе эволюции расширяется. Цикл расширения следует за циклом сжатия, вслед за которым снова наступает цикл расширения и так до тех пор, пока полностью не релаксирует метастабильное вещество внутреннего ядра. В настоящее время Земля, по модели, переживает цикл сжатия. Об этом, в частности, говорит тот факт, что на 95% площади Земли доминирует сжатие, а на 5%, только в зоне влияния рифтов, - растяжение (Кропоткин, 1984).

По оценке одного из ведущих геодезистов России Машимова (1996), земной радиус уменьшается в настоящее время со скоростью 1 см в год, полярное сжатие уменьшается на 1×10^{-9} в год, а центр инерции смещается в юго-западном направлении на 2 см в год.

Фундаментальные характеристики Земли показывают (Машимов, 1996), что:

1. По данным повторных гравиметрических наблюдений, сила тяжести увеличивается со скоростью $dg/dt \approx 4$ мкГал в год. Оценка dg/dt по изменению GM и уровневого потенциала геоида W_o , дает величину несколько меньшую: 3 мкГал/год.

2. Уменьшение объема Земли $1/V (dV/dt) \approx -0.2 \times 10^{-10}$ год⁻¹. При этом объем ложа океана уменьшается со скоростью 0.03 км³/год.

3. Произведение гравитационной постоянной на массу Земли (GM) постоянно с точностью, не хуже 10^{-11} год⁻¹.

4. Динамический параметр J_2 , определенный по наблюдениям векового возмущения расстояния перигея орбиты ИСЗ, равен 10^{-10} год⁻¹.

5. Каждый год на Земле происходит более 1 млн. землетрясений с магнитудой $M \geq 3$. Общая выделяющаяся энергия 10^{26} эрг в год. Землетрясения, как и вулканы, меняют «лик Земли» и её динамические характеристики: тензор инерции и геоид. ***Динамика Земли главным образом связана с изменением параметров геоида.***

6. Основные интегральные характеристики, определяющие динамику Земли, это полярное сжатие a , экваториальное сжатие a_e и долгота I_o большой полуоси экваториального эллипса геоида. Вековые изменения этих параметров: $da/dt = -0.22 \times 10^{-9}$ год⁻¹, $da_e/dt = 3.6 \times 10^{-9}$ год⁻¹, $dI_o/dt = -0.3'$ год⁻¹. Современные данные: $a = 0.0033528132$; $a_e = 0.0000108728$; $I_o = -14^\circ 54'$.

7. Наблюдаемое уменьшение моментов инерции (не более 0.16×10^{-6} год⁻¹) соответствует уменьшению объема геоида.

Выводы. Исследование временных изменений параметров геоида является главной задачей геодинамики. Изучение временных изменений тессеральных гармоник геоида, отражающих пространственное распределение аномалий масс в земной коре и верхней мантии, может оказаться полезным для прогноза землетрясений и извержений вулканов (Машимов, 1996). Модель горячей Земли находится в полном соответствии с фундаментальными характеристиками Земли, чего нельзя сказать о модели холодной Земли и плитной тектонике.

Литература

- Бердыев А.А., Мухамедов В.А. Землетрясения - фликкер-шум? ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 5. С. 1077-1081.
- Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/f-шума. УФН. 1983. Т.141. № 1. С. 151.
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.
- Иванов С.С. Самоподобие последовательности инверсий геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1993. Т. 33. № 5. С. 181-186.

Иванов С.С. Мультифрактальные свойства и размерность аттрактора обращений геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1996. Т. 36. № 4. С. 149.

Карта осей палеомагнитных аномалий мирового океана. Составители: Карасик А.М. и Сочеванова Н.А. ЛО ИЗМИРАН. Л.: 1981.

Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. УФН. 1996. Т. 166. № 11. С.1231 - 1240.

Кропоткин П.Н. Пульсационная геотектоническая гипотеза В.А.Обручева и мобилизм. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. С.24-33.

Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнх. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.

Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990.

Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. С. 166-172.

Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.

Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1973. 417 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.

Ламб Г. Гидродинамика. М.: Гостехиздат. 1947.

Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра. 1983. 143 с.

Маслов Л.А. Изучение динамики крупномасштабных движений литосферы по значениям высот геоида. В кн. Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии. Киев: Наукова думка. 1988. С. 193-197.

Машимов М.М. Геодинамические аспекты изучения изменений фундаментальных характеристик Земли во времени. Геодезия и картография. № 9. 1996. С.24-28.

Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с.

Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли. 2003. № 1. С. 53-56.

Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.

Рузмайкин А.А., Трубицын В.Л. Статистика инверсий геомагнитного поля за последние 80 млн. лет. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 166.

Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М.: ИЛ. 1952. 264 с.

Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.

Харланд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 188 с.

Чудинов Ю.В. Расширение Земли и тектонические явления: о направлении движений в окраинно-океанических зонах. Геотектоника. № 1. 1981. С. 19-37.

Эвернден Дж.Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли $\epsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.

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.

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. V. 59. N. 4. 1987. P. 381.

Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976. 486 p.

Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander and core-mantle coupling. Science 1987. V. 237. P. 1140-1147.

Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. Nature. 1992. V. 356. P. 16.

Geodynamic map of the Circum-Pacific region, North-West quadrant. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. 1985. USA.

- Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H. Splitting functions of long-period normal modes of the Earth. *J. Geophys. Res.* 1988. V.93. №. B11. P.13716.
- Harabaglia P., Doglioni C. Topography and gravity across subduction zones. *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 5. P. 703-706.
- Imakire T. Crustal deformation observed by GEONET, 2000. Geography and Crustal Dynamics Research Center. <http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html>
- Kato T., Kotake Y., Nakao S. et al., Initial results from WING, the continuous GPS network in western Pacific area. *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. NO. 3. P. 369-372.
- Kerr R.A. Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? // *Science* 2006. V. 313. P. 1726.
- Kuznetsov V.V. Characteristic features of continental drift. *Modern Geology.* 1990. V. 14. P. 239-243.
- Larson R.L., Olson P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 107. № 3/4. P. 437.
- Lewis Ch., Smith A.D. The geoid, plate configuration and Antarctica. *Геофизический журнал.* 1998. Т. 20. № 4. С. 3-8.
- Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature.* Freeman.: N.Y.1983. 272p.
- Mazaud A., Laj C. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 107. № 3/4. P. 689.
- Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. *Science.* 1969. V. 166. P. 609-621.
- Nolet G., Karato S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 248. P. 685-699.
- Plate-tectonic map of the Circum-Pacific region. Pacific basin sheet. 1985. Chairman M.T.Halbouty. Tulsa. Oklahoma. USA.
- Scalera G. Paleopoles on an expanding Earth: a comparison between synthetic and real data sets. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990 V. 62. P. 126-140.
- Schmidt P.W., Embleton B.J.J. A geotectonic paradox: has the Earth expanded? *J. of Geophysics.* 1981. V. 49. P. 20-25.
- Steiner J. An expanding Earth on the basis of sea-floor spreading and subduction rates. *Geology.* 1977. V. 5. P. 313-318.
- Tarling D.H. *Palaeomagnetism.* Chapman & Hall. London. 1983.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a "small-circle" assessment of the Gondwanan polar-wander path. *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 115-122.
- Turcote D.L. Fractals in Geology and Geophysics *Pure Appl. Geoph.* 1989. V. 131. № 1.
- Van Hilten D. Palaeomagnetic indications of an increase in the Earth's radius. *Nature.* 1963. V. 200. P. 1277-1279.
- Vogel K. Recent crystal movements in the light of Earth expansion theory. 6th International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth". Potsdam. 1989. P. 284-289.
- Ward M.A. On detecting changes in the Earth's radius. *Geoph. J.R.Astron. Soc.* 1963. V. 8. P. 217-225.