

II. УЧЕНИЕ О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ЕЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ

О связи фигуры Земли с ее происхождением, эволюцией, строением и процессами внутри планеты. Понятие об истинной фигуре Земли - геоиде, его математическое и геофизическое обоснование, геометрическое представление, место и условия наблюдения. Земля как 2- и 3-осный эллипсоиды вращения, размеры полюсей, геометрическое (полюсное и экваториальное) динамическое сжатия (Стейси, 1972).

Понятие о неустойчивости вращения Земли, периодах Эйлера и Чандлера, периодических и не периодических изменениях скорости ее вращения, нутации и прецессии (Стейси, 1972; Викулин, Кролевец, 2001).

Определение массы, средней плотности и момента инерции Земли, значение последнего для познания строения планеты. Земля как фигура равновесия неоднородной вращающейся жидкой массы (приблизительно) и вытекающий отсюда вывод о ее слоистом внутреннем строении (Ботт, 1974).

Форма Земли и геодинамика (Кузнецов, 2000).

История вопроса. Задача об устойчивости формы (т. е. фигуре) космических тел насчитывает, по крайней мере, более чем 150-летнюю историю. Эта задача пришла из астрофизики - надо было понять: почему небесные тела имеют форму близкую шаровой и, в то же время, никогда не имеют строго шаровую форму.

Такие исследования, по сути, были начаты И. Ньютоном, активно продолжены французской школой математики и другими учеными. Решением этой задачи занимались Маклорен, Томсон, Дарвин, Джинс, Дирихле, Дедекин, Риман, Кирхгоф, Чаплыгин, Ляпунов, Пуанкаре, Ляв и др. Наиболее полные результаты были получены А.М. Ляпуновым, А. Пуанкаре, П. Дирихле, Б. Риманом и др.

А.М. Ляпунов (Ляпунов, 2000) в конце XIX в. получил общий класс решений задачи устойчивости для фигуры вращающейся жидкости в виде «грушевидных форм». Эти результаты до настоящего времени являются самыми полными. Серьезно этой задачей занимался также А. Пуанкаре (Пуанкаре, 2000).

П. Дирихле поставил задачу об устойчивости вращающегося гравитирующего тела, которое в любой момент имеет форму эллипсоида и координаты частиц являются линейными функциями своих начальных значений. Сам П. Дирихле рассмотрел частный случай сфероида. Ю. Дедекин, подготовивший работу П. Дирихле к печати, нашел еще один класс решений. Но наиболее полное решение поставленной П. Дирихле задаче дал Б. Риман (Поплавский, Соловьев, 2000). Он показал, что при условии линейной зависимости поля скоростей от координат, движение, при котором сохраняется эллипсоидальная форма равновесия, есть суперпозиция равномерного вращения и внутренних движений с равномерной завихренностью жидкости.

Параллельно искались решения «плоского» варианта такой задачи, которые могут быть применены к атмосферам, гидросферам (и, по-видимому, некоторым твердотельным частям, которые на геологических отрезках времени ведут себя как жидкости) планет (Ламб, 1947). Здесь классический результат принадлежит Г. Кирхгофу (1816 г.) Он получил стационарное решение в виде вращающегося с постоянной угловой скоростью эллиптического пятна с постоянной завихренностью. Через несколько лет его решение обобщил С.А. Чаплыгин, найдя решение для пульсирующего эллипса. В 1893 г. Ляв доказал, что решение Г. Кирхгофа является устойчивым до тех пор, пока отношение осей эллипса не превышает 3. Если это соотношение превышено, то вихрь распадается на более мелкие вихри.

О связи фигуры Земли с ее происхождением, эволюцией, строением и процессами внутри планеты. При рассмотрении ряда проблем физики Земли форма нашей планеты представляет существенный интерес, так как форма неразрывно связана с содержанием, т. е., в нашем случае, со строением Земли, с процессами в ней протекающими, с историей возникновения и развития земного шара. Таким образом, посредством изучения фигуры Земли можно подойти к выяснению ряда физических свойств материала, слагающего нашу планету, к выяснению хода ряда физических процессов внутри Земли.

Сформулированный вывод общего плана можно, например, пояснить с помощью следующих данных.

При неравномерном распределении масс планет и их плотностей в солнечной системе (табл. 1.1) размеры орбит их траекторий связаны законом Бодэ (1.1). Такая «закономерная неравномерность», как отмечалось выше (раздел 1), есть следствие химической дифференциации вещества в солнечном облаке. При этом такой механизм разделения вещества должен был сопровождаться процессом передачи от центрального тела к системе момента орбитального количества движения, величина которого также распределена неравномерно и имеет резкий максимум для планет – гигантов Юпитера и Сатурна (табл. 1.2). Эти данные позволяют предположить, что разделение вещества (химическая дифференциация) во вращающемся солнечном облаке осуществлялось посредством ротационного (вихревого) механизма путем передачи момента.

Каждая из планет солнечной системы представляет собой волчок – вихрь, величина которого также неравномерно распределена в солнечной системе (табл. 1.3). Более того, амплитуды планетарных вихрей пропорциональны их орбитальным угловым моментам (табл. 1.2). Представляется, что такое совпадение не случайно и, по-видимому, лежащее в его основе явление может быть использовано для объяснения закона Бодэ.

Понятие об истинной фигуре Земли - геоиде, его математическое и геофизическое обоснование, геометрическое представление, место и условия наблюдения (Стейси, 1972; с. 30-34). Под формой Земли естественно понимать форму физической поверхности твердой части планеты. Однако в силу большой сложности этой поверхности из нее давно стали выделять более простую (более гладкую часть), в качестве которой принимают невозмущенную приливами, ветрами и т.д. поверхность океана, продолженную некоторым образом под континенты. От этой поверхности "уровня моря" ведется отсчет высот при изучении формы физической поверхности Земли или, как обычно принято говорить, рельефа земной поверхности.

Вращение Земли создает центробежные силы, которые приводят к образованию экваториального вздутия, из-за которого форма Земли существенно отличается от сферической (рис. 2.1).

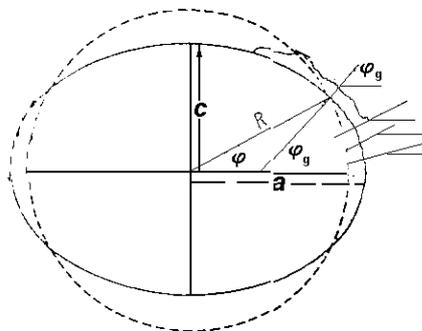


Рис. 2.1. Сравнение геоида (сплошная линия) с шаром того же объема (пунктирная линия). Сжатие геоида преувеличено примерно в 50 раз. Радиус шара $R=(a^2c)^{1/3}$, где a и c – большая и малая полуоси. Координата φ - географическая широта точки; φ_g – географическая широта или угол между нормально к поверхности геоида в точке наблюдения и экваториальной плоскостью.

Если бы весь земной шар был покрыт неглубоким морем, то форма поверхности (без учета несущественных возмущений, вызванных ветром, приливами и т.д.) полностью определялась бы гидростатическим равновесием воды под действием силы тяжести и сил, возникающих из-за вращения Земли. Получающаяся эквипотенциальная поверхность соответствует уровню моря и называется **геоидом**; она определяет фигуру Земли. Чтобы понять физический смысл понятия геоида для суши, нужно представить себе узкие каналы, прорытые через материки и соединенные с океаном. Уровень воды в таких каналах соответствовал бы поверхности геоида.

На средний геоид накладываются приливные эффекты, вызванные градиентами гравитационных полей Луны и Солнца. Но эти эффекты очень малы по сравнению со сжатием Земли, вызываемые ее вращением. Детали рельефа земной коры (материки, горные хребты) создают заметное отклонение реальной земной поверхности от геоида. Однако компенсация масс на некоторой глубине (принцип изостазии) ослабляет влияние рельефа земной поверхности на форму геоида.

Форма геоида была установлена астрономо-геодезической съемкой, проведенной по нескольким дугам на материках. В каждом пункте наблюдения определяется вертикаль, или направление локального вектора силы тяжести относительно звезд. По результатам съемок, произведенных с 1900 по 1960 гг., была найдена величина сжатия геоида. Она заключена в пределах от 1/297 до 1/298,3. В тех же пределах лежат значения сжатия, полученные от гравиметрических измерений. Эти оценки сжатия сделаны по измерениям на материках. В последнее время из анализа орбит спутников найдено более точное значение сжатия 1/298,25. Им и предпочитают теперь пользоваться.

Геоид является поверхностью постоянного геопотенциала U_0 . В каждой точке Земли полный геопотенциал складывается из потенциала силы тяжести V и члена, зависящего от вращения Земли:

$$U = V - \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2) = V - \frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (2.1)$$

где ω - угловая скорость вращения Земли. Ось z направлена по оси вращения Земли, а x , y или r , φ - координаты точек на земной поверхности. В точках внутри Земли полный потенциал содержит еще один член, зависящий от давления. На поверхности ускорение силы тяжести направлено по нормали к геоиду и вычисляется по формуле:

$$g = -gradU. \quad (2.2)$$

Таким образом, задача вычисления формы геоида сводится к получению выражения для V . Если бы распределение масс внутри Земли было известно, то V можно было получить прямым интегрированием. Мы же пойдем обратным путем и постараемся получить сведения о внутреннем строении Земли из формы геоида.

При общем подходе к задаче следует обратиться к уравнению Лапласа, которому должен удовлетворять потенциал V во всех точках, находящихся вне Земли и, следовательно, в пределе - на самой поверхности Земли:

$$\nabla^2 V = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0, \quad (2.3)$$

где r - расстояние от центра Земли, φ и λ - геоцентрические широта и долгота точки, $\theta = \pi/2 - \varphi$ - геоцентрическое полярное расстояние.

В разложении по степеням $1/r$ потенциал V можно представить:

$$V = -\frac{GM}{r} \left(J_0 P_0 - J_1 \frac{a}{r} P_1(\theta) - J_2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 P_2(\theta) + \dots \right), \quad (2.4)$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса Земли, a - экваториальный радиус, J_0, J_1, \dots - безразмерные постоянные, зависящие от распределения масс внутри Земли, которые требуется определить, P_0, P_1, \dots - полиномы Лежандра, $P_0 = 1$.

$J_0 = 1$, поскольку на больших расстояниях (сферическое приближение):

$$V = -\frac{GM}{r}. \quad (2.5)$$

Если выбрать за начало координат центр Земли, то $J_1 = 0$. Тогда во втором приближении (сфероид Клеро) потенциал будет определяться из выражения:

$$V = -\frac{GM}{r} + \frac{GMa^2}{2r^2} J_2 (3\sin^2 \varphi - 1). \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) можно определять распределение масс внутри Земли. Покажем это. С этой целью определим выражения для сжатия Земли и получим уравнение для поверхности геоида.

Выражение для потенциала V в точке P (рис. 2.2) через главные моменты инерции Земли дается соотношением Мак-Кулло:

$$V = -\frac{GM}{r} - \frac{G}{2r^3} (A + B - 3C) l^2, \quad (2.7)$$

где A , B и C - моменты инерции Земли относительно осей x , y и z соответственно,

$$I = Al^2 + Bm^2 + Cn^2, \quad (2.8)$$

l , m , n - направляющие косинусы точки P на рис. Относительно осей x , y , z .

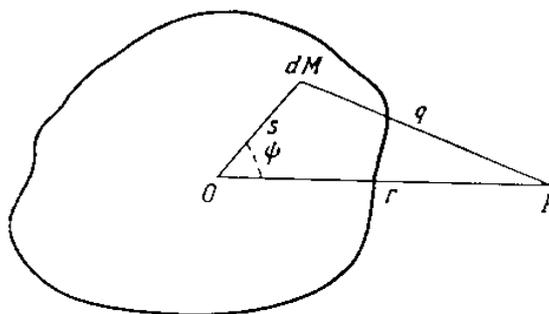


Рис. 2.2 Интегрирование потенциала силы тяжести для вывода формулы Мак-Кулло. Потенциал вычисляется в точке P , расположенной вне тела массы M , на расстоянии r от ее масс O . При интегрировании r постоянно; переменные интегрирования s и φ координаты элементы массы относительно O и прямой OP .

Из-за симметрии Земли относительно оси z :

$$A = B, \quad (2.9)$$

$$n^2 = \sin^2 \varphi = 1 - l^2 - m^2. \quad (2.10)$$

Т. о:

$$V = -\frac{GM}{r} + \frac{G}{2r^3} (C - A)(3\sin^2 \varphi - 1). \quad (2.11)$$

Откуда:

$$J_2 = \frac{C - A}{Ma^2}. \quad (2.12)$$

Полный геопотенциал равен:

$$U_0 = -\frac{GM}{r} + \frac{G}{2r^3} (C - A)(3\sin^2 \varphi - 1) - \frac{1}{2} r^2 \omega^2 \cos^2 \varphi. \quad (2.13)$$

По определению, геоид определяется как поверхность постоянного потенциала U_0 . На экваторе ($r = a$, $\varphi = 0$) и полюсах ($r = c$, $\varphi = \pi/2$) имеем соответственно:

$$U_0 = -\frac{GM}{a} - \frac{G}{2a^3} (C - A) - \frac{1}{2} a^2 \omega^2, \quad (2.14)$$

$$U_0 = -\frac{GM}{c} + \frac{G}{c^3}(C - A). \quad (2.15)$$

Отсюда находим разность между значениями радиусов на экваторе ($r = a$) и на полюсе ($r = c$):

$$a - c = \frac{C - A}{M} \left(\frac{a}{c^2} + \frac{c}{2a^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{ca^3 \omega^2}{GM}. \quad (2.16)$$

Таким образом, полагая в правой части уравнения (2.16) $a \approx c$, сжатие ε с точностью до членов первого порядка выражается формулой:

$$\varepsilon = \frac{a - c}{a} = \frac{3}{2} \frac{C - A}{Ma^2} + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM}. \quad (2.17)$$

Величина сжатия имеет порядок величины $\varepsilon \approx 10^{-3}$, поэтому ошибка из-за отбрасывания членов порядка ε^2 сравнима по величине с отброшенными высшими гармониками в разложении потенциала силы тяжести. С той же точностью уравнение для поверхности геоида записывается в виде:

$$r = a(1 - \varepsilon \sin^2 \varphi). \quad (2.18)$$

Второй член в (2.17) уверенно определяется по отношению центростремительного ускорения к ускорению силы тяжести на экваторе:

$$m = \frac{\omega^2 a^3}{GM} = 3,4678 \cdot 10^{-3}. \quad (2.19)$$

По спутниковым данным значение для J_2 , принятое теперь в качестве стандарта Международным геодезическим и геофизическим союзом, равно:

$$J_2 = 1,08270 \cdot 10^{-3}. \quad (2.20)$$

Из (2.17) для сжатия получаем:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} m = 3,3579 \cdot 10^{-3}. \quad (2.21)$$

При удержании членов второго порядка малости для величины сжатия получается более точное значение:

$$\varepsilon = 3,35280 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{298,26}. \quad (2.22)$$

Гравитационное притяжение Луны и Солнца, действуя на экваториальное вздутие Земли, создает момент, вызывающий прецессию оси вращения Земли. По скорости прецессии определяется динамическое сжатие Земли:

$$H = \frac{C - A}{C} = 3,2732 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{305,51}. \quad (2.23)$$

Таким образом, из уравнений (2.12), (2.20) и (2.23) находим полярный момент инерции Земли:

$$C = \frac{J_2}{H} Ma^2 = 0,33078 Ma^2. \quad (2.24)$$

Из формулы (2.24) видно, что момент инерции Земли меньше момента инерции однородного шара, так как для последнего численный множитель равен 0,4. Следовательно, массы заметно концентрируются к центру Земли. Кроме того, полученное таким образом значение C представляет одно из основных условий, которым должно удовлетворять радиальное распределение плотности внутри Земли. Благодаря этому условию можно рассчитать пределы изменения плотности в слоях (раздел 5), выделяемых в недрах Земли методами сейсмологии (раздел 3).

Принимая, что распределение плотности известно из сейсмических данных, и допуская, что на всех глубинах существует гидростатическое равновесие, можно вернуться к задаче о фигуре Земли и, пользуясь этими результатами, рассчитать ее фигуру равновесия. Сравнение сжатия геоида (2.21) и динамического сжатия (2.23) показывает,

что поверхности внутренних слоев имеют меньшее сжатие, чем поверхность Земли, так как если бы сжатие всех слоев постоянной плотности было одинаковым, то выполнялось бы соотношение:

$$\frac{C-A}{C} = \frac{a^2 - \frac{1}{2}(a^2 + c^2)}{a^2} \approx \frac{a-c}{a}. \quad (2.25)$$

Наблюдаемое различие можно было ожидать, так как вещество внутренних слоев, ограниченных поверхностями постоянного потенциала, обладает большей средней плотностью, чем Земля в целом. Поэтому для них вклад в потенциал от вращения Земли меньше, чем вклад в потенциал силы тяжести.

Гидростатическая теория с точностью до первого порядка дана Джеффрисом, который показал, что сжатие поверхности можно выразить через момент инерции следующим образом:

$$\varepsilon_H = \frac{\frac{5}{2}m}{1 + \frac{25}{4}\left(1 - \frac{3}{2} \frac{C}{Ma^2}\right)}. \quad (2.26)$$

В этой формуле m берется из (2.19), а C/Ma^2 – из (2.24). Однако, формула (2.26) недостаточна для того, чтобы по ней можно было установить различие между сжатием по гидростатической теории и наблюдаемым сжатием.

Поправка к (2.26) была получена численно с использованием данных о распределении плотности в Земле (раздел 5). Вычисления дали $\varepsilon_H = 1/299,7$. Как видим, различие между сжатием ε и динамическим сжатием ε_H несомненно: Земля сжата примерно на 0,5% сильнее, чем следует из гидростатической теории.

Земля как 2- и 3-осный эллипсоиды вращения, размеры полуосей, геометрическое (полюсное и экваториальное) динамическое сжатия (Стейси, 1972, с. 37). Избыточное сжатие не так уж и велико. Если в разложении потенциала силы тяжести рассматривать только члены второго порядка и вычесть равновесное сжатие, то Земля оказывается трехосным эллипсоидом с главными моментами инерции $A' > B' > C'$, причем $(C' - A')/(B' - A') \approx 2$. Соответствующее соотношение осей можно ожидать с наибольшей вероятностью для случайно развивавшегося сфероида. Если такое тело вращается, то на его форму накладывается вздутие, вызванное вращением. Если тело неидеально упругое (т.е. может течь), то вздутие принимает равновесную (гидростатическую) форму, накладывающуюся на исходное сжатие. При этом тело поворачивается так, что ось наибольшего исходного (неравновесного) момента инерции совпадает с осью вращения. Кажется маловероятным, что добавочное сжатие представляет собой запаздывание реакции экваториального вздутия на замедление вращения Земли.

Отклонение от условий гидростатического равновесия означает, что в мантии существуют касательные напряжения, поддерживаемые статически и динамически. Их величина должна быть порядка 10^8 дин/см.

Понятие о нестабильности вращения Земли, периодах Эйлера и Чандлера, периодических и непериодических изменениях скорости ее вращения, нутации и прецессии (Стейси, 1972, с. 37-43). Из уравнения (2.11) видно, что в разложении потенциала силы тяжести, кроме члена, пропорционального r^{-1} , имеется меньший член, пропорциональный r^{-3} , который обусловлен сжатием Земли. Этот член зависит от угловой координаты φ . Следовательно, на массу m , расположенную в точке (r, φ) , кроме центральной силы тяготения $-m \frac{\partial V}{\partial r}$, действует момент сил $-m \frac{\partial V}{\partial \varphi}$. Поэтому на массу Земли в свою очередь действует момент сил, равный по величине и противоположный по направлению.

Моменты, возникающие из-за действия Луны и Солнца на экваториальное вздутие, вызывают прецессию земной оси (рис. 2.3). Период прецессии составляет 25800 лет.



Рис. 2.3. Причина прецессии земной оси. Гравитационное воздействие Солнца на экваториальное вздутие создает момент одного и того же направления во время обоих солнцестояний и не создает никакого момента во время равноденствий.

Полное исследование показывает, что на прецессию накладывается малая нутация, или качания полюса мира вокруг полюса эклиптики. На самом деле имеется несколько нутаций, возникающих из-за эллиптичности орбит Земли и Луны, расположенных в разных плоскостях, а также от слабого воздействия других планет.

Независимо от гравитационного взаимодействия с другими телами Земля испытывает свободную, эйлеровскую прецессию. В геофизической литературе ее обычно называют свободной нутацией или чандлеровскими колебаниями по имени первооткрывателя. Колебания возникают из-за того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения остается постоянным и по величине и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности круг с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли (рис. 2.4). Ось вращения Земли практически фиксирована в пространстве и чандлеровское колебание полюса выражается в периодических вариациях широты с периодом $T_{ch} = 430 - 435$ суток и переменной амплитудой, составляющей, в среднем, $0,14''$.

По аналогии с вращающимся волчком, который можно рассматривать как жесткое твердое тело, можно получить выражение для периода свободной прецессии Земли. Суть вычислений заключается в следующем. Полная энергия вращения больше, чем энергия вращения относительно оси S . Избыток энергии вращения приводит к стремлению тела восстановить состояние симметричного вращения и создает эффективный гироскопический момент. Рассматривая его как внешний момент, вызывающий вынужденную прецессию, получим угловую скорость свободной (эйлеровской) прецессии жесткой твердой Земли, или, как полагают, теоретический период Чандлера (ch):

$$\omega_{ch} = -N\omega, \quad (2.27)$$

где N – динамическое сжатие, определяемое выражением (2.23), ω – угловая скорость вращения Земли.

Как можно видеть, теоретическое значение $T_{ch, теор} = 2\pi/\omega_{ch} = 305$ суток не равно на практике определенному значению периода Чандлера T_{ch} . Более того, вариации широты с частотой ω_{ch} на практике не выявлены. Это может указывать на то, что Землю нельзя

рассматривать как жесткое тело, и, следовательно, чандлеровские колебания, возможно, не являются свободной прецессией планеты.

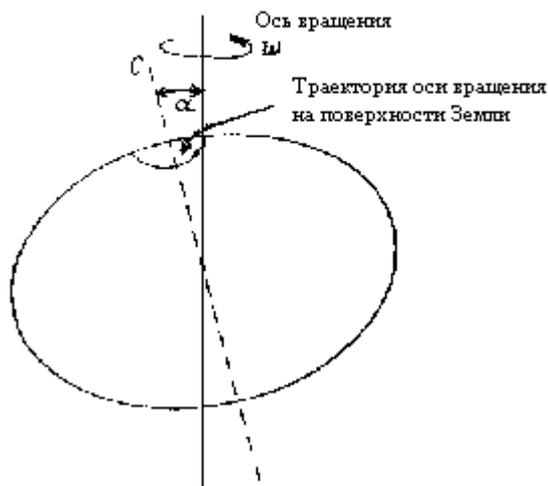


Рис. 2.4. Чандлеровское колебание полюса. Периодические изменения широты связаны с тем, что Земля движется как единое целое и ее ось вращения, оставаясь неподвижной в пространстве, описывает конус с раствором 2α вокруг оси наибольшего момента инерции.

Колебания Чандлера и сейсмотектонический процесс (Викулин, Кролевец, 2001). В рамках ротационной модели сейсмического процесса (см. раздел 3) исследуется природа взаимосвязи сильных землетрясений с прецессией полюса планеты. Получены следующие результаты. 1) Прецессия полюса планеты вызывается «нулевыми» колебаниями, генерируемыми сейсмотектоническим процессом в пределах верхней части литосферы. 2) Чандлеровская частота «расщепляется» на две $f_{ch1} = 0,835 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch1} = 437$ дней) и $f_{ch2} = 0,860 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch2} = 425$ дней), что определяется различием значений нулевых частот для меридионально (тихоокеанского) и широтно (альпийско-гималайского) ориентированных сейсмических поясов. 3) Распределение значений радиусов траекторий движения полюса по их числу имеет регулярную составляющую $0'',05$, что в пересчете на энергию нутации по порядку величины равно сейсмотектонической энергии, сбрасываемой в очагах сильнейших землетрясений. Формулируется гипотеза, согласно которой взаимосвязь солнечной активности с сейсмотектоническим процессом обеспечивается взаимодействием годовой компоненты прецессии полюса с чандлеровскими частотами f_{ch1} и f_{ch2} .

Геоид по спутниковым данным (Стейси, 1972, с. 60-65). Выше было показано, что на экваториальное вздутие Земли действуют моменты, создаваемые Солнцем и Луной и вызывающие прецессию земной оси (рис. 2.3). Конечно, и Земля, в свою очередь, создает моменты такой же величины и противоположного направления, действующие соответственно на Солнце и на Луну. Момент, действующий на Луну, оказывает заметное влияние на ее орбиту. Аналогичным образом экваториальное вздутие воздействует на движение искусственных спутников Земли. Масса искусственных спутников мала и поэтому не оказывает заметного влияния на движение Земли. В то же время орбиты спутников изменяются, и их изменение дает наиболее точные сведения о крупномасштабных отклонениях Земли от сферической симметрии.

Геоид, построенный по спутниковым данным (рис. 2.5), по форме мало отличается от эллипсоида. Эти отклонения в 1000, а может быть и более раз меньше сжатия

эллипсоида. Тем не менее, их можно обнаружить, прослеживая изменения элементов спутниковых орбит.

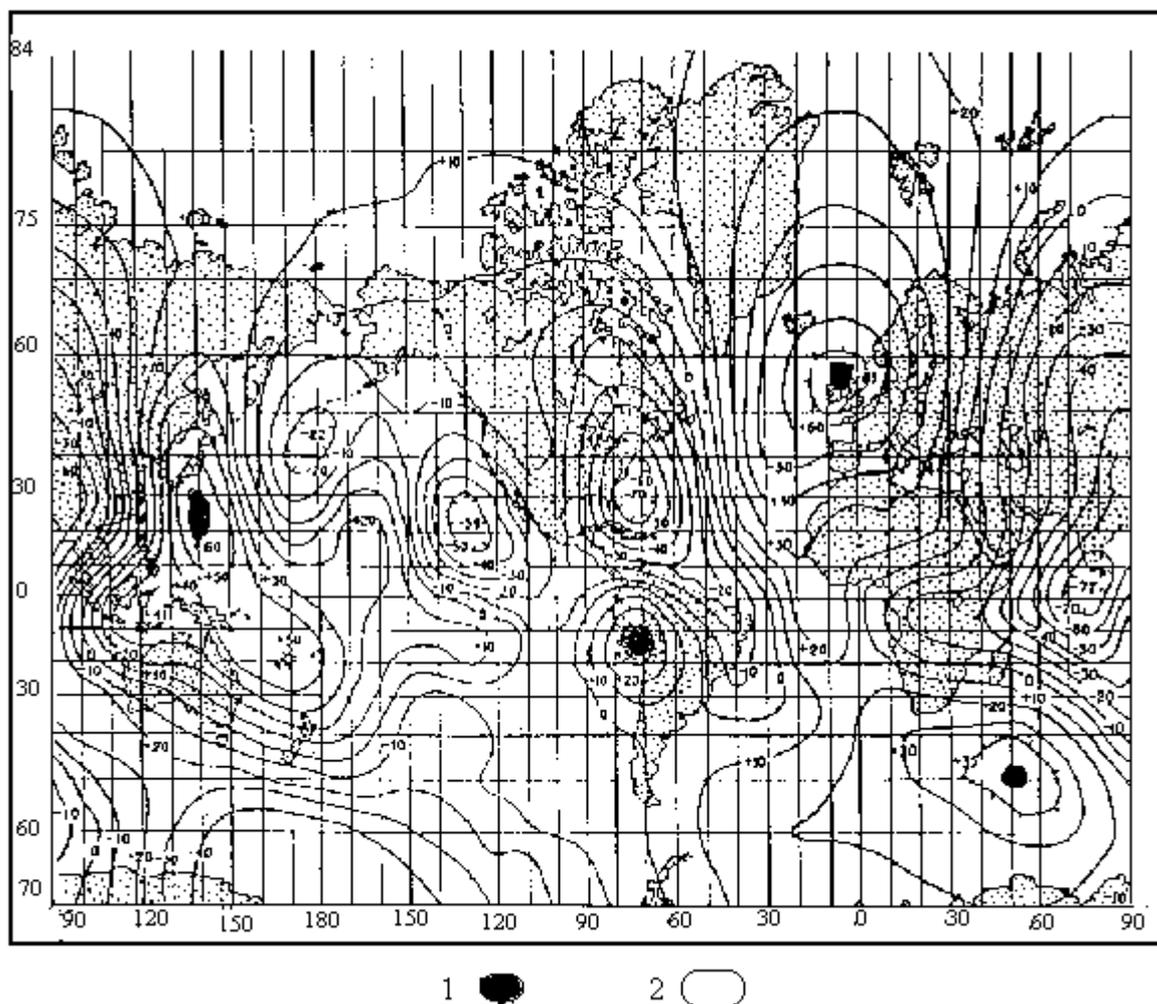


Рис. 2.5. Карта геоида по спутниковым данным. На изолиниях указаны отклонения (в метрах) поверхности геоида от эллипсоида со сжатием, соответствующим измеренному значению J_2 с учетом коэффициента J_4 связанного с J_2 при разложении до членов второго порядка малости по сжатию. 1, 2 – области максимальных и минимальных значений отклонений поверхности геоида от эллипсоида (Стейси, 1972, с. 64).

Изучение орбит искусственных спутников Земли значительно расширило наши знания о глобальной структуре гравитационного поля Земли и, кроме того, позволило в 30 раз повысить точность определения сжатия. Экваториальное вздутие Земли заметно влияет на орбиту движения спутника. Если спутник движется к северо-востоку и пересекает экватор в северном направлении, то точка пересечения его орбиты с экватором будет постепенно смещаться к западу (рис. 2.6 а). Скорость перемещения орбиты к западу позволяет вычислить сжатие.

Сжатие для Земли постоянной плотности, вычисленное Ньютоном, равно $1/230$. Французская геодезическая экспедиция XVIII в. в результате своих измерений получила значения, находящиеся в пределах $1/310 - 1/178$. До наблюдений искусственных спутников для сжатия обычно использовалось значение $1/297,3$, найденное Джеффрисом с ошибкой около $1/300$ этой величины по материалам гравиметрических измерений на поверхности Земли. Наблюдения орбит искусственных спутников дают величину $1/298,25$ с точностью $1/30000$. Средний экваториальный радиус равен $a = 6378,160$ км, полярный – $c = 6356,775$ км.

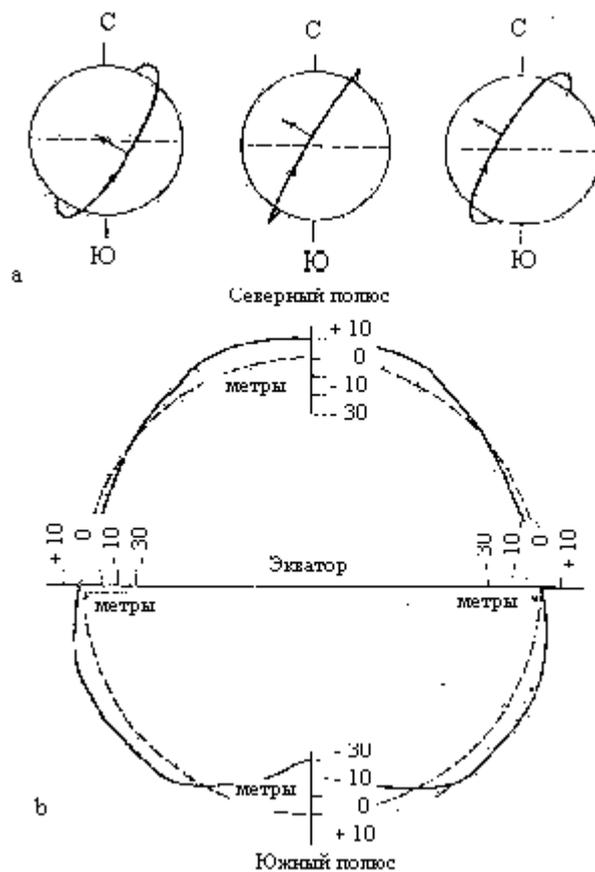


Рис. 2.6. *a* – экваториальное вздутие Земли заставляет поворачиваться к западу орбиту движущегося в восточном направлении искусственного спутника. По скорости поворота орбиты вычисляется сжатие Земли. *b* – высота геоида (сплошная кривая) относительно сфероида со сжатием $1/298,25$ (пунктирная линия) в предположении, что Земля симметрична относительно полярной оси. Масштаб не выдержан. (Ботт, 1974; с. 13).

Уклонение геоида от сфероида (референц-эллипсоида) лучше всего можно определить по вариациям гравитационного поля на поверхности Земли. Наблюдения орбит искусственных спутников Земли позволили значительно усовершенствовать эти определения. Подобные наблюдения доставляют нам более точные данные о вариациях гравитационного поля для более обширных районов, чем измерения, выполняемые в настоящее время на поверхности Земли. Вместе с тем гравиметрические наблюдения на поверхности все еще остаются наилучшим способом изучения локальных вариаций гравитационного поля и геоида в пределах расстояний менее 2000 км.

Один из наиболее известных выводов «спутниковой геодезии» состоит в том, что Земля имеет «грушевидную» форму. В действительности же отклонения геоида от сфероида, создающие грушевидность, меньше 20 м (рис. 2.6 б), в то время как экваториальное вздутие Земли превышает 20 км ($a - c = 21,385$ км).

Интересно, что расположение поднятий и впадин поверхности геоида не связано со строением земной коры (материками и океанами). Это один из самых поразительных результатов, показывающих, что существует компенсация масс (изостазия) в континентальных масштабах. Если бы материки были просто наложены на идеально слоистую эллипсоидальную Землю, то наблюдалась бы четкая связь формы геоида с очертаниями материков, и разница в высотах между поднятиями и впадинами на поверхности геоида была бы в 10 раз большей. Отсутствие связи между формой геоида и материками наводит на мысль, что особенности формы геоида либо определяются различиями плотности в глубоких частях мантии (глубже пластичного слоя в верхней

мантии, существование которого, как полагают, обеспечивает изостатическое равновесие), либо зависят от различий в плотности, поддерживаемых динамически (благодаря конвекции). В последнем случае неоднородности в распределении плотности, скорее всего, располагаются в верхней мантии.

Определение массы, средней плотности и момента инерции Земли, значение последнего для познания строения планеты. Земля как фигура равновесия неоднородной вращающейся жидкой массы (приблизненно) и вытекающий отсюда вывод о ее слоистом внутреннем строении (Ботт, 1974; с. 14-16). Массу Земли можно оценить по величине ускорения силы тяжести на ее поверхности с учетом небольшой поправки за влияние вращения. В упрощенной форме этот способ можно пояснить следующей схемой. Будем считать Землю радиально-симметричной не вращающейся сферой. Тогда можно показать, что ускорение свободного падения на поверхности Земли равно $g = GM/r^2$, где r – расстояние от центра сферы, M – масса и G – гравитационная постоянная. Притяжение и радиус планеты точно известны. Постоянная G определена экспериментально с ошибкой около 0,03%. Предполагать радиальную симметрию Земли нет необходимости, если известна ее фигура или сила тяжести на всей поверхности. Таким образом, M может быть вычислена с той же точностью, с которой известна гравитационная постоянная, т. е. с ошибкой порядка 0,03%. По этой величине определение G часто называют «взвешиванием Земли». Из массы и объема Земли можно получить ее среднюю плотность. Так, масса $M=5,977 \cdot 10^{27}$ г, средняя плотность $\rho_0 = 5,517$ г/см³.

Если предположить, что Земля симметрична относительно своей полярной оси, тогда у нее будет два главных момента инерции: A – относительно экваториальной, и C – относительно полярной оси. Их можно определить двумя последовательными этапами по результатам астрономических наблюдений и известной из измерений величине сжатия.

И средняя плотность, и моменты инерции Земли указывают, что плотность должна сильно увеличиваться с глубиной. Среднюю плотность и моменты инерции важно знать при изучении распределения плотности внутри Земли, так как любая приемлемая модель плотности должна удовлетворять этим измеренным значениям. Моменты инерции необходимы и для определения фигуры Земли, которую она бы имела, если бы находилась в состоянии гидростатического равновесия.

Таким образом, видим, что фигура Земли, как и других планет и их крупных спутников в солнечной системе, действительно является прямым следствием протекающих внутри планеты процессов. Более того, по-видимому, можно сделать вывод о том, что протекающие в настоящее время внутри планетные процессы несут на себе «отпечаток» процессов, определявших и продолжающих определять формирование солнечной системы. Механизм, определяющий такое «наследие», по-видимому, может быть связан с вихревыми свойствами пространства – времени. На это указывают результаты проведенного в начале этого раздела исторического обзора (см. с. 45), согласно которого существует два, по-видимому, независимых класса решений, каждый из которых в состоянии обеспечить устойчивость формы вращающихся гравитирующих жидких тел, какими можно считать исходное газо-пылевое облако и образовавшиеся в процессе эволюции этого облака планеты: решения «грушевидной формы» А.М. Ляпунова (2000) и вихревые решения П. Дирихле – Ю. Дедекинда – Б. Римана (Ламб, 1947; Поплавский, Соловьев, 2000).

Форма Земли и геодинамика (Кузнецов, 2000, с. 198). «Геодинамика занимает “ключевую” позицию в современной геологии и здесь накопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов и парадоксов. Среди них, несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения; несоответствие длины периметра Тихого океана идее распада Пангеи (парадокс Мезервея); нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов, направлению дрейфа материков; 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.

Ниже попытаемся разобраться в некоторых из этих несоответствий, связанных с несоответствием сжатия современной Земли со скоростью ее вращения (Кузнецов, 2000, с. 198-202).

Парадокс Эверндена. Заголовком к этому разделу взято название недавно опубликованной 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 Лэмба (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 $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

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

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

Отдавая должное Дж. Эвердену и его смелому утверждению о негидростатичности Земли и отмеченному им несоответствию T и $1/\varepsilon$, 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 (см. рис. 2.7). 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? Попробуем найти такое решение...

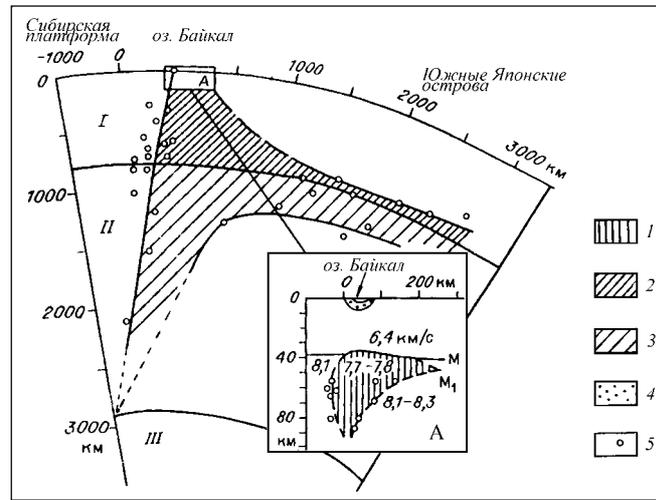


Рис. 2.7. Сейсмический разрез мантии по линии Байкал - южные Японские острова (на врезке - разрез земной коры и верхов мантии через Южно-Байкальскую впадину): 1 – аномальный слой верхней мантии; 2 – аномальная зона с дефицитом скорости $v_p = 0.09$ км/с; 3 – то же с дефицитом 0.07 км/с; 4 – осадочные породы; 5 – проекция пересечения сейсмического луча с контуром аномальной мантии. I – верхняя, II – нижняя мантия, III – ядро Земли (Крылов и др. 1993).

Оценки М.В. Стоваса. Обратимся к работам М.В.Стоваса (1975), к сожалению, не получившим должного освещения в литературе по физике Земли. (Такого же мнения придерживается и К.Ф. Тяпкин (1998), автор новой модели геоизостаии, раздел V – А.В.). Он обратил внимание на очевидный факт, что изменение угловой скорости вращения Земли обуславливает изменение полярного сжатия упруго-пластического тела Земли, что, в свою очередь, приводит к сопряженной деформации всех её основных параметров. При этом возникают широтные, меридиональные и радиальные напряжения в коровом слое, что является причиной возникновения особо напряженного состояния в широтных зонах между $30 - 40^\circ$ в обоих полушариях - зонах перемены знака главных напряжений.

Изменение ротационного режима Земли вызывает соответствующее изменение потенциала центробежных сил и, следовательно, изменение главной части потенциала U деформирующих сил, который непосредственно определяет сжатие Земли:

$$U = 1/3 \omega^2 a^2 (1 - 3 \sin^2 \varphi). \quad (2.28)$$

Величина полной деформирующей силы:

$$F = 1/3 \omega^2 a (1 + 3 \sin^2 \varphi)^{1/2}. \quad (2.29)$$

Формулы, аналогичные (2.29), могут быть записаны для составляющих силы F (F_N , F_R , F_k) (Стовас, 1975, с. 27). Из решения уравнений для составляющих силы для эллипсоида Красовского следуют 4 вывода:

- 1) нормальная F_N (а, следовательно, и радиальная F_R) деформирующая сила на “критической” параллели ($\pm 35^\circ$) равна нулю;
 - 2) на полюсах и экваторе нормальная сила F_N равна силе F .
 - 3) тангенциальная деформирующая сила F_k , на “критической” параллели, равна F .
 - 4) на полюсах и экваторе тангенциальная сила F_k равна нулю.
- При изменении угловой скорости вращения Земли ω будут изменяться F_k и F_R :

$$\frac{\partial F_k}{\partial \omega} \sim 2\omega a (1 - \varepsilon) \frac{\partial r}{\partial \varepsilon}; \quad \frac{\partial F_R}{\partial \omega} \sim 2\omega (1 - \varepsilon) \frac{\partial r}{\partial \varepsilon}; \quad (2.30)$$

здесь $\frac{\partial r}{\partial \varepsilon}$ сопряженное изменение радиуса-вектора эллипсоида; r - радиус-вектор эллипсоида; a - экваториальная полуось; ε - сжатие. Рис. 2.8-а демонстрирует изменение F_R в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли. Изменение деформирующих сил F_R и F_k при изменении скорости вращения вызывает изменение формы геоида. Перемена знака силы происходит на 35-ой параллели.

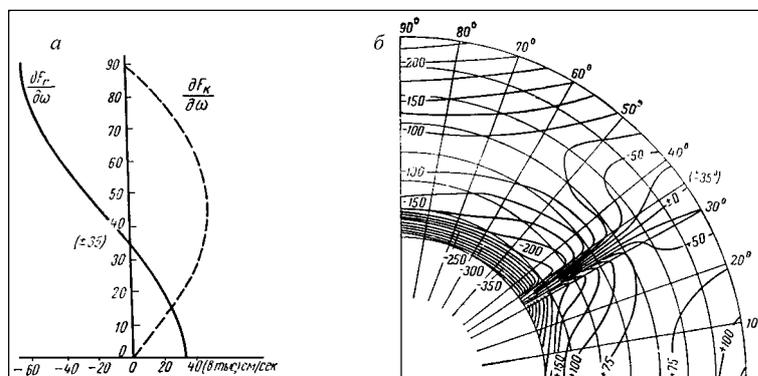


Рис. 2.8. а - Изменение F_R и F_k в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли; б - Распределение главного напряжения по широте и глубине. Модель D. Изолинии проведены через 25 дин/см² (Стовас, 1975).

Изменение параметров эллипсоида при изменении ε от 1/210 к современному 1/298 характеризуется тем, что площадь земной поверхности в районе экватора уменьшается (на 184214 км²), а площадь в районах полюсов увеличивается, соответственно (на 183474 км²). Величина радиуса a уменьшается примерно на 3 км, а c - возрастает примерно на 6.

М.В. Стовас подсчитал изменения главных напряжений σ при изменении полярного сжатия на 10^{-7} , для четырех моделей А, В, С и D:

- 1) А: $R - R_0 = 64$ км; $\sigma = 2 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 2) В: $R - R_0 = 127$ км; $\sigma = 4 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 3) С: $R - R_0 = 640$ км; $\sigma = 7 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 4) D: $R - R_0 = 2900$ км; $\sigma = 2 \times 10^{12}$ дин/см²;

здесь R - радиус Земли, R_0 - внутренний радиус сферы.

Как можно видеть из этих оценок и рис. 2.8-б, величина главного напряжения σ_1 , оцененная М.В. Стовасом для различных глубин $R - R_0$, заметно превышает литостатическое давление Земли на этих глубинах.

Наши оценки величин лапласовых “поверхностных” напряжений, возникающих в верхней оболочке литосферы при её “растекании”, показывают, что для соблюдения Землей принципа минимизации гравитационной энергии возникают усилия $> 10^{11}$ дин/см², по порядку величины близкие приведенным выше.

Ответ на вопрос Дж.Ф. Эверндена. Итак, суть парадокса, замеченного Эвернденом, заключается в сильной негидростатичности Земли. Это выражается в том, что для $T = 24$ часа, Земля должна была бы обладать обратным сжатием $1/\varepsilon = 232$, в то время как она имеет $1/\varepsilon = 298$. Вывод, к которому он приходит, состоит в том, что “Земля всегда была такой” и никогда не была гидростатичной. Заметим, что Дж. Эвернден не сомневается в том, что Земля раньше вращалась заметно быстрее, правда, причину замедления он не обсуждает.

Вопрос Дж. Эверндена поставим в такой плоскости: была ли на Земле ситуация, когда $1/\varepsilon = 232$, или сжатие Земли всегда было $1/\varepsilon = 298$? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то $\varepsilon = 0$, а $1/\varepsilon = \infty$. Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали, $1/\varepsilon_g = 232$, а она имеет: $\varepsilon_g > \varepsilon > 0$. В течение эволюции радиус Земли (R) увеличивался, возрастал и период вращения T . (За счет

сохранения момента количества движения Земли: $MvR = \text{const}$, $v = R/T$, период T то же возрастал: $T \sim R^2$). Длительность периода вращения $T = 16$ часов примерно соответствует (по нашей модели) времени около 400 млн. лет назад, когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а дальше стала наращиваться жесткая мантия. Этот момент соответствует: $1/\varepsilon = 100$ (при $T = 16$ ч.). На рис. 2.9 прямая 1 показывает зависимость $1/\varepsilon$ (T) для реальной Земли $1/\varepsilon = 298$ при $T = 24$ ч. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ($1/\varepsilon \sim T$) для гидростатичной Земли (Эвернден, 1997).

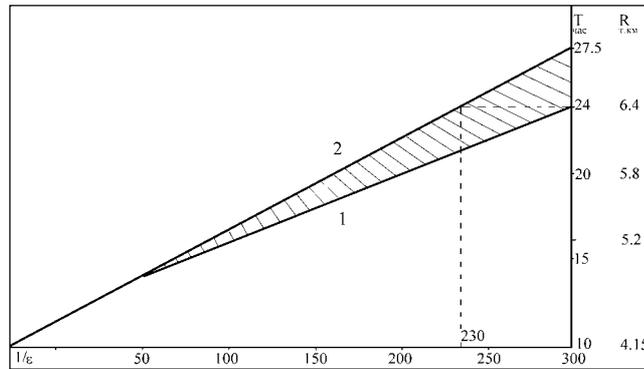


Рис. 2.9. а) Зависимость величины обратного сжатия $1/\varepsilon$ от длительности периода вращения Земли T для: 1 - реальной и 2 - гидростатичной Земли.

Разность величин $1/\varepsilon$ 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: $a_1 = a_0 (1 + \varepsilon_1/3)$, а “жесткой”, $a_2 = a_0 (1 + \varepsilon_2/3)$. Введем параметр $\delta = (a_1 - a_2) / (a_1 - a_0) = 1 - \varepsilon_2/\varepsilon_1$. Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии $\delta = 0$, что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли, $\delta = 0.22$ (22 %). Для абсолютно твердой сферы: $\delta = 1$. 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.

Таким образом, парадокс Эверндена разрешается в модели горячей Земли сравнительно просто: параметр фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$ говорит о том, что она расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения $1/\varepsilon$, а степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Сейчас самое время вернуться к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой с обратным сжатием $1/\varepsilon = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать?

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 2.9, из которого 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 .

Согласно модели «Горячей Земли» генерация мантии происходит в D”-слое, скорость процесса кристаллизации «контролируют» рТ-условия в этом слое, которые, в свою очередь, определяются гидродинамикой внешнего ядра и её степенью сжатия. Так

как внутренние оболочки Земли всегда имеют сжатие меньшее, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле $1/\varepsilon = 298$, а не 232».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ботт М.** Внутренне строение Земли. М.: Мир. 1974. 376 с.
2. **Викулин А.В., Кролевец А.Н.** Чандлеровское колебание полюса и сейсотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. №6. С. 996-1009.
3. **Джеффрис Г.** Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.
4. **Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р.** и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S- волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.
5. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
6. **Ламб Г.** Гидродинамика. М.: Гостехиздат. 1947. 928 с.
7. **Ляпунов А.М.** Общая задача об устойчивости движения. Череповец: Изд-во «Меркурий-ПРЕСС». 2000. 254 с.
8. **Поплавский А.А., Соловьев В.Н.** Гипотеза о макросейсмическом дефекте, порождающем землетрясения // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН.. 2000. С. 235-242.
9. **Пуанкаре А.** Фигуры равновесия жидкой массы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика». 2000. 208 с.
10. **Тяпкин К.Ф.** Физика Земли. Киев: Вища школа. 1998. 312 с.
10. **Стейси Ф.** Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.
11. **Стовас М.В.** Избранные труды. Ч. I. М.: Недра. 1975. 155 с.
12. **Эвернден Дж.Ф.** О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? // Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.