

Что приводит в движение земную кору?

Е. В. Артюшков

Доктор физико-математических наук



Евгений Викторович Артюшков, старший научный сотрудник Института физики Земли АН СССР. Занимается проблемами физики твердой Земли. Автор работ, посвященных происхождению движений в недрах Земли и на ее поверхности. Член редколлегии журнала «Природа».

Вопрос о механизме напряжений, действующих в земной коре, возник более ста лет назад. Без знания этого механизма нельзя по-настоящему понять, как происходят движения земной коры, почему возникают землетрясения и как их можно предсказывать. В свою очередь, если установить основные закономерности деформаций горных пород, это существенно помогло бы в поисках полезных ископаемых.

Напомним, что земная кора образует верхнюю, наиболее легкую оболочку твердой Земли. Ее толщина в среднем составляет несколько десятков километров. Уже давно было установлено, что кора плавает на более плотной мантии. Глубина погружения коры в мантию обычно подчиняется закону Архимеда: где поверхность Земли повышается, толщина коры возрастает (под высокими горами она достигает 60—70 км), там же, где поверхность Земли понижена, толщина коры уменьшается (под океанами она составляет всего 5—7 км). Подобное положение коры называется изостатическим равновесием, или просто изостатическим. Отклонения от него в большинстве областей Земли невелики.

Давление в земной коре возрастает с глубиной. Известно, однако, что распределение напряжений в ней не гидростатическое, оно не подчиняется закону Паскаля. Силы, действующие в горных породах в вертикальном и горизонтальном направлениях, обычно оказываются различными. Добавочные, по сравнению с изостатическим, гидростатическим распределением, напряжения и приводят к появлению

различных типов движений земной коры.

О том, что большие добавочные напряжения действуют в земной коре в современную эпоху, свидетельствуют землетрясения. Их энергия за один год в среднем равна 10^{28} эрг (часть этой энергии выделяется в мантии). Энергия того же порядка выделилась одновременно при катастрофических землетрясениях в Чили в 1960 г. и на Аляске в 1964 г. Она равна энергии взрыва водородной бомбы с тротильным эквивалентом в несколько тысяч мегатонн.

А действовали ли большие напряжения в земной коре в прошлом? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо рассмотреть деформации пород в горных областях, где слоистость образуют многочисленные складки (рис. 1). Большинство горных пород очень вязкие и прочные. Поэтому, чтобы их сильно деформировать, на них должны действовать какие-то мощные силы. Складчатые деформации возникали в горных породах на протяжении всей геологической истории Земли, т. е. по крайней мере в течение нескольких последних миллиардов лет в земной коре действовали большие напряжения. Отметим кстати, что широкое распространение больших деформаций типа складок показывает, что для больших интервалов времени вещество коры ведет себя не как упругое тело, а как некоторая вязкая среда.

Многие ученые предполагают, что отдельные континенты дрейфуют по поверхности Земли. Например, Америка и Европа с Африкой около 200 млн лет назад составляли единый континент, а затем они разорвались и

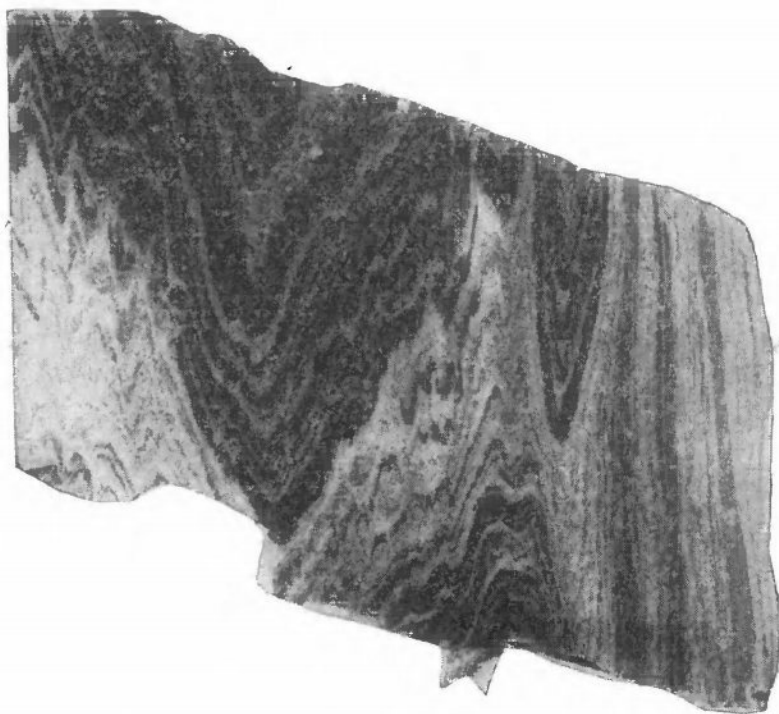


Рис. 1. Мелкие складки в железистом кварците, образованные в результате деформации земной коры (Кривой Рог).

Фото В. В. Эза

разошлись в стороны на 4 тыс. км. Между ними образовался Атлантический океан. Считается, что континенты дрейфовали и в предшествующие геологические эпохи. Чтобы передвигать континенты на расстояние в тысячи километров, также необходимы большие силы.

Добавочные напряжения в коре в масштабах всей Земли образуют упорядоченную систему. Согласно сейсмическим данным, на оси срединно-океанических хребтов, которые протягиваются по дну океана на 80 тыс. км, действуют растягивающие напряжения. Наоборот, в глубоководных впадинах, опоясывающих кольцом Тихий океан, в коре существуют напряжения сжатия. Согласно различным оценкам, величина напряжений достигает от нескольких сот до нескольких тысяч килограммов на квадратный сантиметр, но точно ее определить раньше не удавалось.

Благодаря действию добавочных напряжений земная кора находится в непрерывном движении. Скорость ее вертикальных и горизонтальных дви-

гает нескольких сантиметров в год, а в отдельных областях, возможно, 10 см в год.

Происхождение напряжений в земной коре

Чтобы объяснить происхождение напряжений в земной коре, исследователи (У. Кельвин, Э. Зюсс, Г. Джеффрис, Э. Буллард и др.) предлагали различные механизмы. В последние десятилетия было широко распространено представление, что в мантии Земли, под корой, существуют мощные конвективные течения, связанные с переносом радиоактивного тепла к поверхности Земли. Считалось, что эти течения увлекают за собой кору в горизонтальном направлении, растягивая ее в одних местах и сжимая в других. Предполагалось, что таким образом в коре и возникают добавочные напряжения.

Правда, предположение о существовании тепловой конвекции в мантии — весьма спорно. Нет никаких данных, что конвекция действительно существует. Более того, недавно бы-

ло установлено, что на небольших глубинах в мантии под корой расположена астеносфера — слой, в котором вязкость мантии резко понижена, по крайней мере в тысячу раз по сравнению с более глубокими слоями. Кроме того, она много меньше вязкости коры. Этот слой пониженной вязкости толщиной от 100 до 200 км играет роль смазочного слоя, который резко уменьшает трение между корой и мантией. Поэтому, если даже в мантии и существуют крупномасштабные течения, нетрудно доказать, что они заведомо слабо влияют на напряжения в земной коре.

Каким же образом в земной коре возникают большие напряжения? Ранее считалось, что, поскольку кора находится в состоянии изостатического равновесия, источник больших напряжений не может быть расположен в самой коре. Однако это неверно. Толщина земной коры, как уже отмечалось, сильно изменяется в горизонтальном направлении. Плавающая на мантии кора разной толщины в поле тяжести обладает большим запасом потенциальной энергии. Поэтому ее состояние существенно неравновесно. В результате земная кора стремится растечься в горизонтальном направлении так, чтобы сгладить неоднородности толщины и уменьшить запас потенциальной энергии. Согласно закону сохранения энергии, уменьшение потенциальной энергии при затухании неровностей верхней и нижней границ коры должно равняться работе вязких напряжений, которая совершается при ее растекании. Отсюда можно легко оценить, какие добавочные напряжения действуют в коре, и оказывается, что они весьма велики.

Нами была предложена общая схема расчета напряжений в земной коре. Проиллюстрируем ее на простейшем примере.

Рассмотрим отрезок слоя некоторого вязкого вещества постоянной толщины h_1 и плотности ρ_1 , плавающий на невязкой и более плотной жидкости с плотностью ρ_2 (рис. 2). Будем считать, что длина отрезка много больше его толщины. Согласно закону Архимеда, отрезок слоя погружается в жидкость настолько,

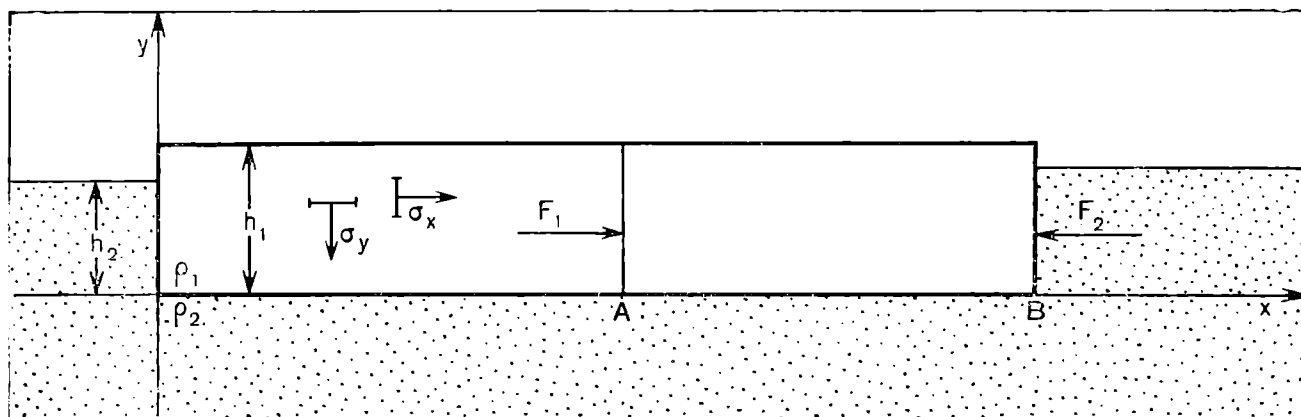


Рис. 2. Отрезок вязкого слоя, плавающий на невязкой жидкости (объяснение в тексте).

чтобы его вес равнялся весу вытесненной им жидкости. При этом выполняется условие

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения, а h_2 — глубина погружения слоя в жидкость.

Введем прямоугольные координаты x, y с началом на нижней границе слоя. Выделим в слое на уровне y единичную горизонтальную площадку. Обозначим действующую на нее сверху силу через σ_y . Эта сила направлена вниз и равна весу вышележащего столба вещества слоя. Высота этого столба равна $h_1 - y$. Отсюда

$$\sigma_y(y) = \rho_1 g (h_1 - y). \quad (2)$$

Выделим теперь на этом же уровне единичную вертикальную площадку, ориентированную перпендикулярно плоскости рисунка. Обозначим силу, действующую на нее слева направо, через σ_x . Рассмотрим, могут ли быть равны друг другу силы σ_x и σ_y , т. е. может ли распределение напряжений в слое быть изотропным.

Выделим для этого элемент слоя, ограниченный его правой границей В и вертикальной плоскостью А, расположенной вдали от границы В. Рассмотрим силы, действующие на элемент АВ в направлении оси x . На границу В действует давление жидкости p , распределенное по закону $p(y) = \rho_2 g (h_2 - y)$. График давления представлен на рис. 3. Давление максимально на уровне нижней границы слоя, при $y = 0$, где оно равно $p(0) = \rho_2 g h_2$. С уменьшением глубины дав-

ление линейно уменьшается и обращается в ноль на поверхности жидкости, т. е. при $y = h_2$. Полная сила F_2 , действующая на границу В¹ (см. рис. 2), равна интегралу от давления по глубине, который численно равен площади треугольника ОСН₂ на рис. 3. Отсюда

$$F_2 = \frac{\rho_2 g h_2^2}{2}. \quad (3)$$

На границу А элемента слоя действует сила σ_x на единицу площади. Допустим, что $\sigma_x = \sigma_x^0 = \sigma_y$, где σ_y определяется (2). Тогда график σ_x^0 также представляет прямую линию (см. рис. 3). При этом σ_x^0 обращается в ноль на верхней границе слоя, при $y = h_1$, а на нижней границе слоя, при $y = 0$, достигает значения $\rho_1 g h_1$. Согласно (1), $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$. Полная сила $F_1 = F_1^0$, действующая на границу А, при $\sigma_x = \sigma_x^0$ равна интегралу от σ_x^0 по толщине слоя. Этот интеграл численно равен площади треугольника ОСН₁, т. е.

$$F_1 = F_1^0 = \frac{\rho_1 g h_1^2}{2}.$$

Согласно третьему закону Ньютона, силы, действующие на левую и правую границы элемента слоя АВ, должны быть равны по величине и противоположны по направлению. Однако из рис. 3 видно, что сила F_1^0 превышает по величине силу F_2 , так как площадь треугольника ОСН₁ боль-

ше площади треугольника ОСН₂ ($h_1 > h_2$). Это означает, что предположение о том, что сила σ_x равна силе σ_y , неверно. Будем искать σ_x в виде

$$\sigma_x = \sigma_x^0 - \sigma = \sigma_y - \sigma. \quad (4)$$

Тогда на левую границу слоя действует сила $F_1 = F_1^0 - \sigma h_1$. Приравняв F_1 и F_2 , находим, что

$$\sigma = \frac{F_1^0 - F_2}{h_1} = \frac{\rho_1 g h_1^2 - \rho_2 g h_2^2}{2 h_1}.$$

Используя условие (1), получаем

$$\sigma = \frac{\rho_1 g (h_1 - h_2)}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, горизонтальная сила, действующая в слое, оказывается меньше вертикальной. Это означает, что в слое имеет место добавочное горизонтальное растяжение. Поверхность слоя находится на высоте $h_1 - h_2$ относительно поверхности жидкости. Поэтому, как следует из (5), добавочное напряжение σ равно половине давления той части слоя, которая выступает над поверхностью жидкости. Так, например, в айсберге, возвышающемся на 20 м над ур. м., действуют добавочные растягивающие напряжения около 1 кг/см².

Мы уже говорили, что для больших интервалов времени, измеряемых миллионами и более лет, земная кора ведет себя как вязкая среда. Вязкость расположенной под корой мантии много меньше вязкости коры. Толщина коры изменяется в горизонтальном направлении. Поэтому в качестве простейшей модели коры можно выбрать вязкий слой плотности ρ_1 и переменной толщины $h(x)$, пла-

¹ Здесь имеется в виду сила, действующая на единицу длины границы в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 2.

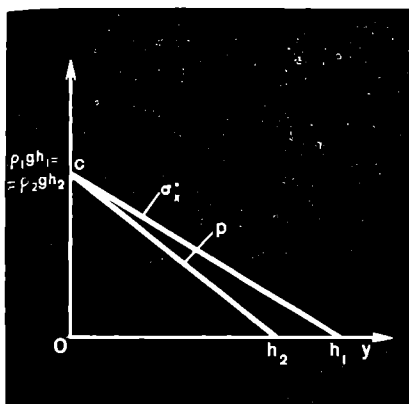


Рис. 3. Распределение по глубине давления p в более плотной жидкости и составляющей σ_x^0 силы, которая действует вдоль слоя на единицу поверхности (объяснение в тексте).

вающий на невязкой жидкости с плотностью ρ_2 . Допустим, что толщина коры плавно изменяется в горизонтальном направлении. Это условие соответствует крупным чертам рельефа поверхности Земли, таким как континенты, океаны, горные системы и т. п. Тогда с помощью схемы, использованной в предыдущем примере для разности $\sigma = \sigma_x - \sigma_y^1$, можно получить следующее соотношение:

$$\sigma = \frac{\rho_1 (\rho_2 - \rho_1) g (h^2 - h_0^2)}{2\rho_2 h} + \frac{C}{h}. \quad (6)$$

Здесь h_0 — среднее значение толщины слоя, а C — константа.

Во многих областях вязкость расплавленных под корой самых вязких слоев мантии также весьма велика, а резкое понижение вязкости в астеносферном слое происходит лишь на глубинах в 60—100 км. В некоторых областях, напротив, кора сильно прогрета и резкое понижение вязкости происходит в ее нижних слоях.

При деформациях большого горизонтального масштаба верхний, наиболее вязкий слой Земли, называемый литосферой, деформируется как единое целое. В результате напряжения, создаваемые неоднородностями толщины коры h , распределяются по толщине литосферного слоя h_1 . Следовательно, их действительное значение

¹ Эта величина представляет среднее по глубине коры значение разности напряжений σ_{xx} и σ_{yy} .

ние должно в h/h_1 раз отличаться от значения (6), соответствующего распределению напряжений по толщине коры. Отсюда следует, что

$$\sigma = \frac{\rho_1 (\rho_2 - \rho_1) g (h^2 - h_0^2)}{2\rho_2 h_1} + \frac{C}{h_1}. \quad (7)$$

Рассмотренная модель является все же сильно упрощенной, так как в действительности земная кора состоит из слоев различной плотности и имеет сферическую форму. Тем не менее, она позволяет установить основные закономерности распределения напряжений в земной коре. Поэтому в настоящей статье мы ограничимся использованием уравнения (7).

Соотношение (7) справедливо для произвольного распределения вязкости коры в плоскости x, y и произвольной зависимости вязкости от касательных напряжений (при этом вязкость предполагается конечной). Поэтому его можно использовать при любом составе и свойствах горных пород, из которых состоит земная кора.

Ранее было хорошо известно, что неровности рельефа с крутыми склонами создают в коре добавочные напряжения. Предполагалось, однако, что с уменьшением наклона рельефа эти напряжения быстро уменьшаются. Таким образом, считалось, что основные неровности рельефа, такие как континенты и океаны, горные хребты и глубокие впадины, например Черноморская, не создают в коре больших добавочных напряжений. Однако это неверно.

Как видно из уравнения (7), добавочные напряжения определяются толщиной коры h и не зависят от ее производных по x . Поэтому в пределах областей, где толщина коры (и литосферы) постоянна, т. е. поверхность Земли находится на одном и том же уровне, добавочные напряжения также сохраняют постоянное значение. Однако с изменением уровня территории по отношению к уровню моря величина напряжений существенно меняется. Так, например, в земной коре под океанами и на континентах действуют существенно различные напряжения.

В уравнение (7) входит константа C . Она соответствует тому, что помимо добавочных напряжений, связанных с

изменениями толщины коры, кора может быть еще сжата или растянута как целое. Эту константу можно определить следующим образом. По дну океанов на 80 тыс. км протягивается грандиозная система срединно-океанических хребтов. На оси хребтов находится разлом, заполненный магмой. Поскольку магма жидкая, то в ней распределение напряжений гидростатическое. Следовательно, разность напряжений σ здесь равна нулю, и левая часть уравнения (7) обращается в нуль. Отсюда легко найти константу C .

В результате оказывается, что под океанами в земной коре действуют добавочные сжимающие напряжения в несколько сот килограммов на квадратный сантиметр. В низменных же областях на континентах, например в районе Москвы, напряжения сравнительно малы.

Напряжения и деформации в горных областях

В горных областях толщина земной коры сильно повышена (рис. 4). Вещество коры стремится растечься в стороны, в результате чего в коре возникают большие добавочные напряжения. Оценки с помощью соотношения (7) показывают, что при $h = h_1$ величина этих напряжений по порядку равна добавочной нагрузке, связанной с рельефом:

$$\sigma \sim \rho_1 g \zeta. \quad (8)$$

Здесь ζ — высота рельефа относительно уровня моря.

Для гор высотой в 3—4 км добавочные напряжения оказываются около 1000 кг/см². Однако по сечению коры напряжения распределяются неравномерно. Вязкость горных пород резко падает с температурой. В областях, где недавно образовались горы, нижние слои коры сильно нагреты. Поэтому вязкость здесь резко понижена, так что толщина литосферы меньше толщины коры. Добавочные напряжения в нижних слоях коры быстро релаксируют и поэтому оказываются малыми. Среднее значение напряжений σ должно оставаться постоянным, так как, согласно (7), оно определяется общей толщиной коры h . Поэтому одновременно с уменьшением напряжений в нижних слоях ко-

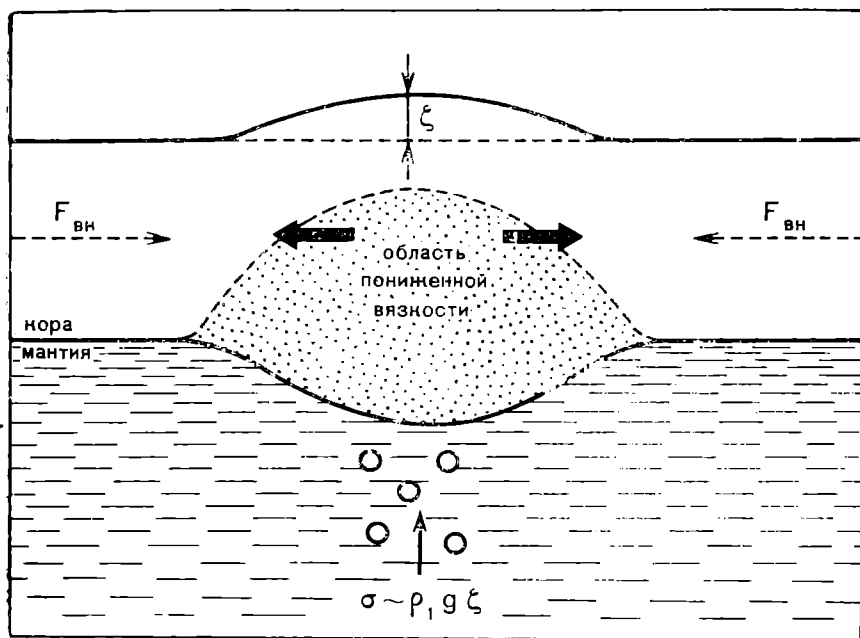


Рис. 4. Схематическое строение земной коры в горной области. $F_{вн}$ — внешние силы.

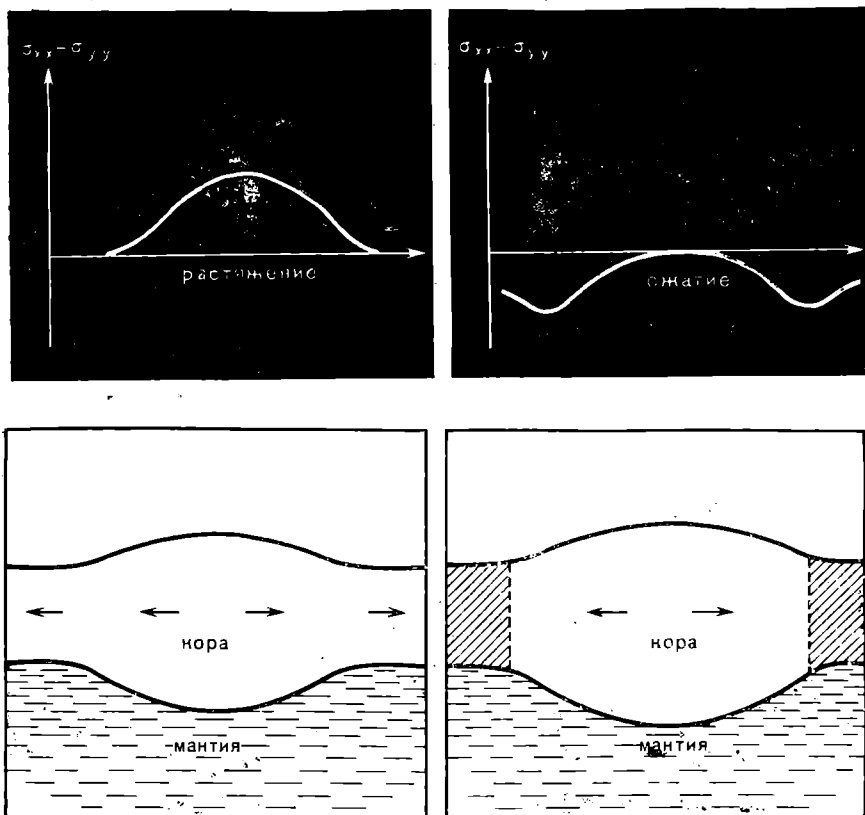


Рис. 5. Распределение добавочных напряжений в горных областях: слева — в случае, когда участки коры, окружающие область поднятия, могут легко смещаться в стороны, справа — в случае, когда соседние участки ограничивают растекание коры в области поднятия (объяснение в тексте).

ры, в ее верхнем слое, более холодном и вязком, напряжения должны возрасти.

Толщину литосферы в молодых горных областях можно оценить по сейсмическим данным. В большинстве из них на континентах основная масса землетрясений происходит в верхнем слое коры толщиной 15—25 км, глубже землетрясений почти нет. Это означает, что растекание коры происходит там гораздо легче, так что большие напряжения не успевают накапливаться. Следовательно, и вязкость коры глубже 15—25 км в таких областях должна быть сильно пониженной.

Общая толщина коры в областях высоких гор (60—70 км) в несколько раз превышает толщину литосферы. Следовательно, напряжения в последнем слое во столько же раз должны превышать среднюю величину разности напряжений $\sigma \sim 1000$ кг/см². Таким образом оказывается, что добавочные напряжения в верхнем слое коры для горных областей составляют несколько тысяч килограммов на квадратный сантиметр.

На основании косвенных соображений рядом геологов, например В. С. Соболевым, цифры такого порядка уже назывались. Однако в них трудно было поверить, поскольку неизвестен был физический механизм, обеспечивающий столь большие напряжения.

Под влиянием напряжений $\geq 10^3$ кг/см² в горных областях возникает растекание коры в направлении от центра к периферии поднятий. Согласно геологическим данным, в процессе деформации горных пород расстояния между фиксированными точками в направлении поперек хребта изменяются на несколько десятков процентов — в несколько раз. Соответствующие горизонтальные смещения коры оказываются порядка нескольких десятков — сотен километров. Такие смещения развиваются на стадии активного горообразования. В этот период кора сильно прогревается, и ее вязкость падает на несколько порядков величины по сравнению со стабильными в тектоническом отношении областями. Через несколько десятков миллионов лет кора остывает, ее вязкость резко повышается и скорость деформаций становится очень низкой.

Земная кора неоднородна в горизонтальном направлении — различные породы часто сменяют друг друга по простиранию. Многочисленные разломы разбивают кору на отдельные блоки размером в десятки — сотни километров. Поэтому на малых расстояниях в одних местах происходит концентрация напряжений, в других — разрежение. Большие деформации геологически неоднородной коры сопровождаются землетрясениями. Они наиболее вероятны в тех областях, где величина разности напряжений $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ достигает максимальных значений.

Интересно сопоставить энергию землетрясений с потенциальной энергией, высвобождающейся в процессе растекания поднятий. Так, например, для района Средней Азии высвобождение потенциальной энергии по крайней мере на один порядок величины превышает энергию землетрясений. Это означает, что землетрясения здесь являются лишь одним из следствий гораздо более мощного процесса растекания неоднородностей земной коры.

Горизонтальное распределение напряжений в горных областях можно определить из следующих соображений. Предположим, что земная кора в области поднятия может растекаться, сравнительно легко раздвигая в стороны соседние участки коры (рис. 5 слева). Тогда основное сопротивление растеканию оказывают вязкие напряжения в коре в области самого поднятия. При этом здесь возникают растягивающие напряжения, величина которых возрастает вместе с высотой рельефа. В соседних же низменных областях напряжения оказываются малы. Так как наибольшие напряжения действуют в центральной, наиболее высокой части поднятия, то именно здесь чаще всего должны возникать землетрясения. К такому типу структур, согласно сейсмическим данным, относятся Байкальское поднятие в СССР и Восточно-Африканские поднятия. Следовательно, здесь должны действовать растягивающие напряжения, а это согласуется с многочисленными геологическими данными.

Допустим теперь, что область поднятия окружена холодными и значи-

тельно более вязкими участками земной коры, которые не могут смещаться в стороны и играют роль жестких стенок (рис. 5 справа). Тогда эти участки оказывают основное препятствие растеканию коры, и в области поднятия под давлением вещества коры, растекающегося от центра к периферии, возникают сжимающие напряжения. Они малы в центральной части поднятия, где его высота имеет наибольшие значения и возрастают с понижением высоты рельефа. Сжимающие напряжения распространяются в этом случае и на соседние низменные области. Однако, в связи с резким повышением толщины слоя, в котором происходит концентрация напряжений, их величина оказывается здесь меньшей, чем в области поднятия.

В структурах подобного типа наибольшее количество землетрясений должно происходить в краевой зоне поднятия, где действуют наибольшие напряжения. Согласно сейсмическим данным, к этому типу структур относятся, например, Памир и Тянь-Шань. Основная часть эпицентров землетрясений сосредоточена здесь в сравнительно узкой зоне, в которой происходит переход от возвышенных областей к низменным. В то же время на Памирском плоскогорье, где абсолютная высота около 3—4 км, землетрясения происходят редко. Это обстоятельство ранее не находило никакого объяснения.

Следует, однако, отметить, что одного знания напряжений в коре для точного определения районов возможных сильных землетрясений еще не достаточно. Напряжения могут быть большими, а землетрясения тем не менее могут и не возникать. Для их возникновения нужно, во-первых, чтобы скорость деформаций коры была столь велика, чтобы среднее по времени выделение энергии было достаточно большим. Во-вторых, нужно, чтобы деформация сопровождалась хрупкими разрушениями, при которых большое количество энергии выделяется одновременно. Следовательно, кроме напряжений надо еще знать, каковы деформационные свойства коры и как они изменяются в пространстве. А тут мы располагаем лишь весьма скудными данными.

Какие же выводы можно сделать на основании полученных результатов относительно механизма горообразования? Большинство исследователей считает, что горы на континентах образуются в результате горизонтального сжатия земной коры какими-то внешними по отношению к горным областям силами. Однако горы сами стремятся растечься в стороны и при этом возникают напряжения (большие или порядка 1000 кг/см^2). Поэтому, чтобы преодолеть это стремление к растеканию и заставить горы сжиматься, нужно приложить еще более мощные напряжения внешнего происхождения, которые не связаны с рассматриваемым здесь механизмом. Поскольку неизвестно ни одного другого механизма, который создавал бы такие же большие напряжения, образование гор за счет сжатия коры маловероятно.

Такой механизм не согласуется и с высокими температурами коры, типичными для областей, где недавно образовались горы. Как известно, тепловые потоки из недр Земли в подобных областях в 1,5—2 раза превышают тепловые потоки в тех местах, где тектонические движения отсутствуют. Отсюда следует, что температура нижних слоев коры здесь должна быть на $300\text{—}400^\circ$ выше, чем в тектонически стабильных областях. Об этом же свидетельствует и большая роль вулканических извержений в формировании многих горных областей.

Рассмотрим, можно ли нагреть кору на $300\text{—}400^\circ$ за счет бокового сжатия. Допустим, что некоторый участок коры начальной ширины L сжимается под действием внешних сил (см. рис. 5), создающих добавочные напряжения σ' на границе области сжатия. Пусть это сжатие приводит к сокращению ширины участка ΔL , что приводит к соответствующему увеличению толщины коры и поднятию ее поверхности. Напряжения σ' должны прежде всего преодолеть стремление коры к растеканию, характеризваемое величиной σ , которая для горных областей оказывается в среднем порядка 1000 кг/см^2 . Работа A разности напряжений $\sigma' - \sigma$ может быть частично превращена в тепло.

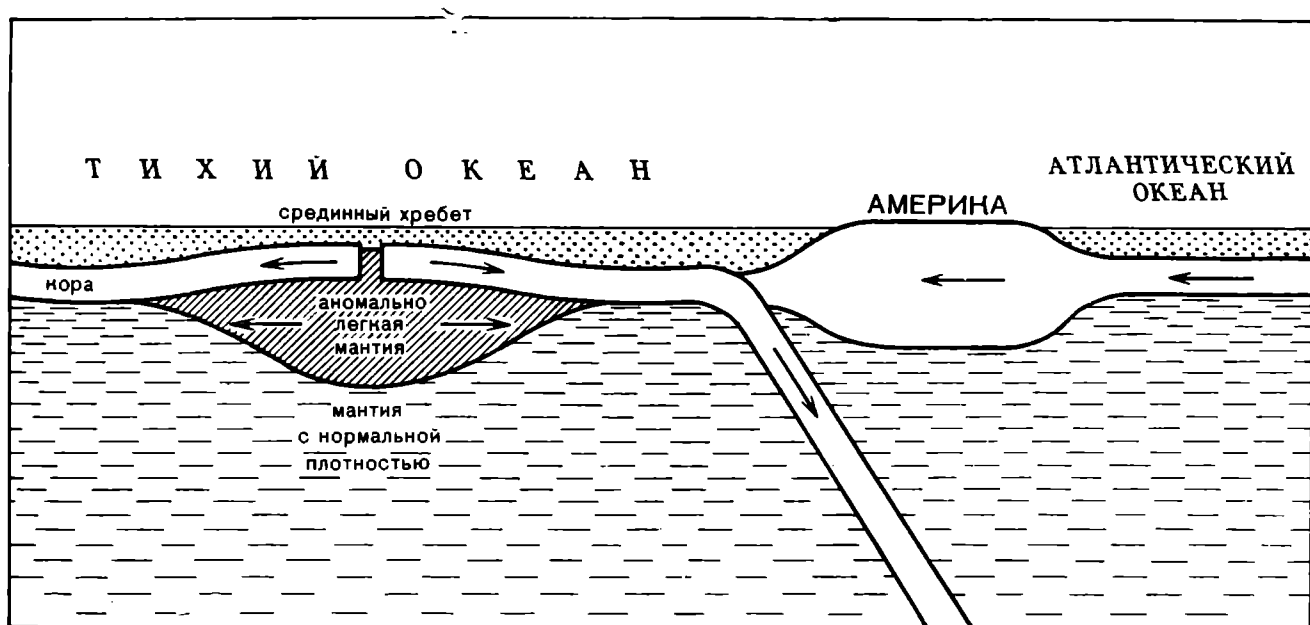


Рис. 6. Схематическая картина горизонтальных движений земной коры, согласно концепции тектоники плит (объяснение в тексте).

Эта работа равна

$$A = (\sigma' - \sigma) h_0 \Delta L \quad (9)$$

на единицу длины вдоль сжимаемой области, где h_0 — толщина коры на границе поднятия.

Объем сжимаемой области сохраняется постоянным и равным $h_0 \cdot L$. Следовательно, среднее значение работы на единицу объема есть

$$a = A/h_0 \cdot L = (\sigma' - \sigma) \frac{\Delta L}{L}. \quad (10)$$

Так как $\Delta L < L$, то величина $\frac{\Delta L}{L}$ меньше единицы. Положим $\frac{\Delta L}{L} = 1/2$, что

соответствует сокращению в два раза ширины области поднятия в процессе сжатия. Пусть, далее, $\sigma' - \sigma = 1000 \text{ кг/см}^2$. Тогда $a = 5 \cdot 10^8 \text{ дин/см}^2 = 5 \cdot 10^8 \text{ эрг/см}^3 \approx 12 \text{ кал/см}^3$. Теплоемкость большинства горных пород, образующих земную кору, лежит в пределах 0,7—0,9 кал/см³. Поэтому для рассматриваемого примера дополнительный нагрев коры не превышает 13—17°.

Для того чтобы нагреть кору на 300—400° за счет бокового сжатия, необходимы напряжения, измеряемые десятками тысяч килограммов на квадратный сантиметр. Нет никаких данных о существовании в коре таких огромных напряжений. Более того,

нетрудно показать, что при наличии напряжений $\sim 10^4 \text{ кг/см}^2$, в коре возникли бы разломы и огромные надвиги на высоту в десятки километров (в миниатюре такое явление наблюдается во время ледохода).

Таким образом, высокие температуры земной коры в горных областях должны быть связаны с притоком большого количества тепла из мантии. Большинство гор образуется относительно быстро, за время в десятки миллионов лет и меньше. За счет теплопроводности в мантии невозможно подвести к коре за такое время большое количество тепла. Это может быть осуществлено только путем переноса тепла поднимающимися из глубины мантии большими массами сильно нагретого легкого материала (см. рис. 4). Присоединяясь к коре, он отдает ей часть своего тепла. Одновременно увеличение толщины коры приводит к ее поднятию, согласно закону Архимеда, и образованию гор на поверхности Земли. Подобный механизм ранее предлагался, в частности, В. В. Белоусовым, он использовался также для объяснения происхождения островных дуг — Камчатки, Курильских о-вов, Японии и др. По-видимому, сходным образом возникают и горы в континентальных областях.

Большие горизонтальные перемещения земной коры

Большой популярностью среди многих геологов пользуется сейчас концепция «тектоники плит». Как известно, по оси срединно-океанических поднятий на дне океанов проходит заполненный магмой разлом (рис. 6). Считается, что участки земной коры под океанами, расположенные с разных сторон от разлома, удаляются друг от друга со скоростью в несколько сантиметров в год. Расширяющийся разлом при этом заполняется поступающими из мантии новыми порциями магмы, которая, «примерзая» к стенкам разлома, образует новую кору океанического типа.

В результате участки коры, разделенные разломом, расходятся на тысячи километров, и между ними возникает новая кора океанического типа. Однако размер Земли при этом сохраняется примерно постоянным. Поэтому образование больших участков новой коры в одних местах должно сопровождаться ее уничтожением в других. Предполагается, что такое уничтожение происходит в глубоководных впадинах вблизи островных дуг, например в районах Камчат-

ки или Японии. Здесь океаническая кора вновь погружается в мантию на большую глубину.

Однако западными учеными была построена лишь кинематическая схема этого явления, а физическая природа оставалась неясной. Учитывая изложенные в этой статье соображения, расширение дна океана можно объяснить следующим образом.

Согласно геофизическим данным, под корой в районах срединно-океанических хребтов находятся огромные массы аномально легкого вещества мантии. Его плотность больше, чем у коры, но меньше обычной плотности мантии под корой. В поле силы тяжести это вещество растекается в стороны, растягивая земную кору. На оси хребтов земная кора разбита разломами, заполненными веществом с пониженной вязкостью. Аномальная мантия сильно нагрета, и ее вязкость очень мала. Поэтому она растекается в стороны с относительно большой скоростью, увлекая за собой кору. Таким образом возникает расширение дна океана.

Допустим теперь, что расширение дна происходит одновременно в двух океанах, разделенных материком, а погружение коры в мантию имеет место только в одном из них. Тогда земная кора, расширяющаяся во втором океане, будет толкать материк в сторону первого океана. Так возникает дрейф материков. Например, считается, что расширение дна океана происходит в Тихом и в Атлантическом океанах, а уничтожение океанической коры — только в Тихом. Поэтому расширение Атлантики должно привести к дрейфу Америки в сторону Тихого океана (см. рис. 6).

Исследователи, занимающиеся проблемой расширения дна океана, предполагают, что в районах островных дуг происходит погружение в мантию не только океанической коры толщиной 5—7 км, но и слоя расположенной под корой мантии толщиной 50—100 км. Этот слой мантии вместе с корой образует океаническую литосферу, значительно более вязкую, чем расположенная ниже астеносфера. Значит, погружение литосферы в астеносферу возможно только в том случае, если вещество литосферы тяжелее вещества астеносферы.

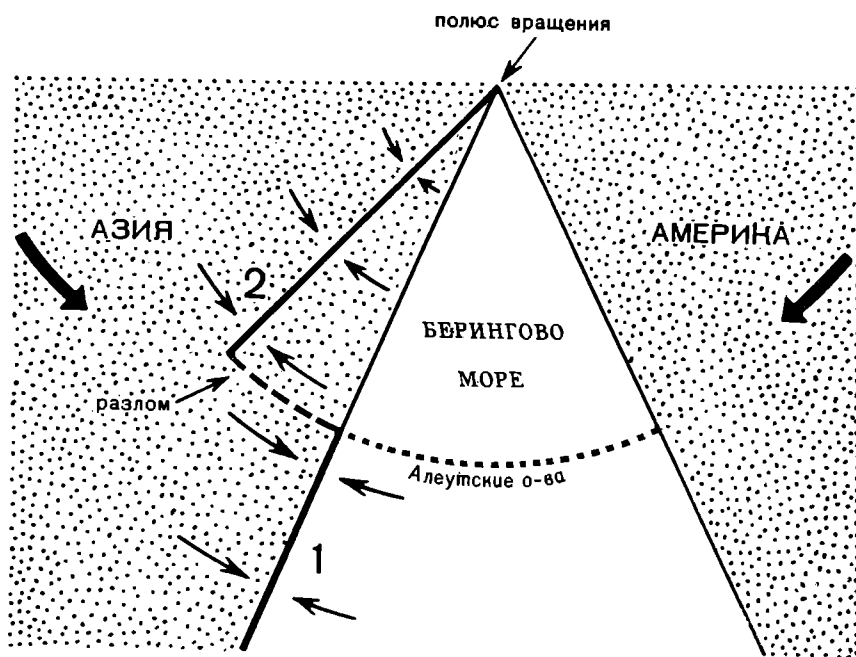


Рис. 7. Схематическая картина относительного движения Азии и Америки вблизи полюса вращения. 1, 2 — линии уничтожения коры (объяснение в тексте).

Маловероятно, чтобы расположенная под дном океана литосфера могла быть тяжелее астеносферы: в таком случае возникла бы конвективная неустойчивость, и литосфера провалилась бы в астеносферу на значительной части площади океанов. Следовательно, для опускания океанической литосферы в мантию в глубоководных впадинах необходимо, чтобы существовал некоторый процесс, резко увеличивающий плотность литосферы при ее небольшом дополнительном погружении в мантию. Таким процессом может быть происходящий на небольших глубинах фазовый переход одного из минералов, составляющих литосферу, в более плотное состояние.

Этот переход мог бы происходить при погружении литосферы на небольшую глубину под влиянием растекания срединно-океанических хребтов, расталкивающих в сторону литосферные плиты. Тогда после утяжеления литосферы за счет фазового перехода могло бы происходить ее дальнейшее погружение в мантию. До сих пор, однако, нет никаких достоверных данных о существовании по-

добного перехода. Если он существует, то расширение дна океана под влиянием напряжений, которые мы рассмотрели, неизбежно. Если же такой переход невозможен, то расширение дна океана не может иметь места.

Для проверки описанной схемы горизонтальных движений земной коры можно предложить следующее направление исследований.

Создатели концепции «тектоники плит» не обратили внимания на одно существенное противоречие, на котором необходимо остановиться подробнее. Расширение Атлантического и Северного Ледовитого океанов сопровождается взаимным удалением Америки и Евразии. В результате с другой стороны Земли, в области Тихого океана, Америка и Азия сближаются, а площадь Тихого океана уменьшается. Уменьшение площади Тихого океана происходит за счет уничтожения океанической коры вокруг Тихого океана. Однако области уничтожения коры существуют только к югу от Алеутских о-вов, а севернее они неизвестны. Другими словами, Азия и Америка там сближаются,

ся, а куда при этом исчезают расположенные между ними участки земной коры,—неизвестно.

Движение жестких плит по сфере можно представить в виде их вращения относительно некоторого полюса (рис. 7). Для Евразии и Америки этот полюс вращения находится вблизи Таймыра. Америка и Евразия вращаются навстречу друг другу. Южнее Алеутских о-вов их сближение компенсируется уничтожением литосферы вдоль линии 1: это — Камчатка, Курильские о-ва, Япония и т. д. Если справедлива «тектоника плит», то уничтожение коры должно происходить и к северу от Алеутских о-вов. Допустим, например, что оно происходит вдоль некоторой линии 2 на Северо-Востоке СССР. Легко заметить, что в этом случае участки земной коры справа от линии 2 и слева от линии 1 должны двигаться в разные стороны. Следовательно, между ними должен существовать так называемый трансформный разлом, разделяющий области с противоположным направлением движения коры. Разность скоростей на нем должна быть около 1 см/год.

Такой разлом нетрудно обнаружить хотя бы потому, что пересекающие его в какой-то момент времени геологические структуры будут затем растаскиваться движущейся корой в противоположные стороны. Кроме того, если сейчас происходит относительное движение континентов, то вдоль разлома должна располагаться цепочка очагов землетрясений.

Очевидно, линия уничтожения (или сжатия) земной коры может располагаться как на Северо-Востоке СССР, так и на северо-западе Северной Америки. Поэтому исследования должны проводиться одновременно в обеих указанных областях. Поиск структур описанного типа представляет своего рода критический эксперимент для всей концепции «тектоники плит». Если же ничего такого найти не удастся, это будет означать, что вся концепция неверна.

Природа тектонических движений

Будем называть «динамосферой» совокупность слоев коры и аномально

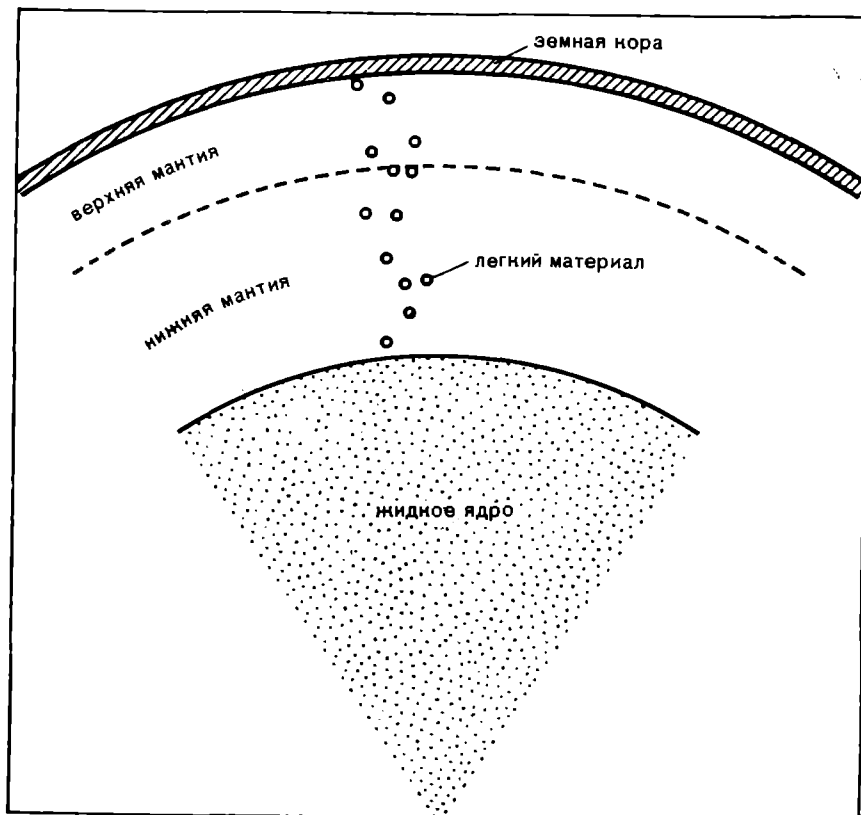


Рис. 8. Движение в мантии Земли легкого материала, выделяющегося на границе ядра и нижней мантии (объяснение в тексте).

легкой мантии¹. Мы рассмотрели горизонтальные движения земной коры, возникающие вследствие растекания неоднородностей толщины этого слоя. Чтобы замкнуть цепь рассуждений, необходимо установить, какой процесс создает такие неоднородности.

Как известно, внутри Земли находится массивное жидкое ядро, значительно более плотное, чем мантия. С другой стороны, согласно современным космогоническим представлениям, первичная Земля по составу была неоднородной. Следовательно, тяжелое вещество земного ядра в процессе эволюции Земли должно было выделиться из первичной смеси различных веществ и опуститься в центральную часть планеты. Это было

хорошо известно геофизикам. Однако ранее упускалось из виду следующее обстоятельство. После отделения тяжелого вещества ядра от первичной смеси веществ остающаяся смесь становится легче первичной. В поле силы тяжести этот легкий материал должен подниматься наверх. Следовательно, рост массивного земного ядра должен сопровождаться поступлением в верхние слои Земли огромных масс легкого материала.

Если бы процесс дифференциации в Земле уже закончился, вся мантия была бы расслоена таким образом, что плотность различных веществ последовательно возрастала бы с глубиной. После этого здесь не могли бы возникать большие вертикальные смещения, так как они сопровождались бы подъемом в поле силы тяжести веществ и опусканием легких. В результате крупномасштабные движения в мантии прекратились бы, а

¹ В динамосфере, как и в коре, отсутствует слой аномально легкой мантии.

крупные горизонтальные неоднородности этого слоя постепенно бы затухли.

В действительности, в верхней мантии Земли обнаружены многочисленные плотностные и температурные неоднородности. Ряд неоднородностей возник сравнительно недавно. Над многими из них расположены активные тектонические образования, возникшие в результате соответствующих изменений состояния мантии. Эти факты свидетельствуют, что крупномасштабные движения в недрах Земли продолжаются, а следовательно, дифференциация ее вещества по плотности еще не закончилась.

Наиболее вероятно, что дифференциация происходит на глубине около 3 тыс. км на границе ядра и мантии (рис. 8). Рассмотрим, как протекает этот процесс. В результате радиоактивного распада температура Земли растет и происходит частичное расплавление вещества нижней мантии на границе с ядром. При этом тяжелое вещество ядра тонет в расплаве и присоединяется к ядру. Остающийся легкий материал накапливается под нижней мантией и периодически поступает в верхние слои Земли.

Нижняя мантия характеризуется высокой степенью горизонтальной однородности. Верхняя мантия и земная кора, напротив, сильно неоднородны. Поэтому наиболее вероятно, что они образованы из легкого материала, выделившегося за время жизни Земли на границе ядра и мантии. В таком случае нижняя мантия представляет собой первичное, еще непродифференцированное вещество Земли. В процессе эволюции Земли происходит рост ядра и верхней мантии за счет нижней мантии.

Легкий материал, поднимаясь от границы ядра и мантии в верхнюю мантию, проходит расстояние в несколько тысяч километров. При этом в поле силы тяжести выделяется огромное количество потенциальной энергии. Поэтому движения в мантии, которые переносят наверх легкий материал, очень мощные. Однако на напряжениях в земной коре сами эти движения сказываются слабо, потому что между корой и основной

частью мантии расположен слой с резко пониженной вязкостью.

Гораздо более существенно другое обстоятельство. Легкий материал поступает в верхнюю мантию с большой глубины, с границы ядра и мантии, где температура гораздо выше, чем в верхней мантии. Напротив, температура плавления в верхней мантии существенно ниже. Поэтому, когда сильно нагретый легкий материал попадает в верхнюю мантию, то ряд его компонент плавится, легкий материал разжижается и в результате происходит вторичная дифференциация по плотности. При этом наиболее легкие вещества, соответствующие по составу динамофере (кора и аномально легкая мантия), всплывают и присоединяются к этому слою, увеличивая таким образом его толщину. Внедрение легкого материала в верхнюю мантию происходит в отдельные периоды и в отдельных областях, в основном, под срединно-океаническими хребтами и их продолжениями на континентах. Кроме того, предполагается, что от погружающихся в мантию океанических литосферных плит отделяется коровый материал, который всплывает и вновь присоединяется к коре в области узких зон типа островных дуг. В результате этих процессов толщина динамоферы увеличивается лишь в отдельных областях, и так возникают основные горизонтальные неоднородности этого слоя. Эти неоднородности изменяются во времени за счет поверхностной эрозии, горизонтального растекания и, возможно, зависят от некоторых физико-химических процессов, протекающих в нижних слоях динамоферы и изменяющих ее плотность. Поэтому распределение напряжений в коре не является неизменным. На протяжении геологической истории Земли оно изменяется вместе со строением динамоферы.

Итак, общую картину динамики земной коры можно представить следующим образом. На границе ядра и мантии происходит дифференциация вещества Земли по плотности. Наиболее легкие компоненты этого вещества, а также вещество коры, поднимающееся в мантии под островными дугами, достигают в конечном итоге земной коры и, присоединяясь

к ней, увеличивают толщину динамоферы в отдельных областях. При этом кора всплывает, согласно закону Архимеда, и таким образом возникают вертикальные движения земной коры. Затем неоднородности толщины динамоферы растекаются в стороны, создавая горизонтальные движения земной коры. Следовательно, общая причина движений земной коры — стремление Земли достигнуть состояния с минимальной потенциальной энергией.

Мы рассмотрели напряжения в земной коре, обусловленные неоднородностями толщины динамоферы, а также некоторые типы движений коры, возникающие под влиянием этих напряжений.

Для расчета напряжений в коре достаточно знать в основных чертах строение динамоферы, которое в настоящее время изучено сравнительно хорошо. Поэтому выводы, относящиеся к самим напряжениям в коре, вполне надежны. Чтобы определить, какие движения коры возникают под действием этих напряжений, как уже говорилось, необходимо знать ее деформационные свойства, которые изучены очень плохо. Поэтому, зная напряжения в коре, еще нельзя сделать четких физических выводов, какие движения коры должны иметь место в действительности. Например, растекание аномально легкой мантии под срединно-океаническими хребтами неизбежно создает в океанической коре значительные напряжения. Однако отсюда еще не следует, что под действием этих напряжений кора должна двигаться в стороны от хребтов. Существование таких движений можно предполагать (или отрицать) лишь на основании других геологических и геофизических данных. Построение детальной картины динамики земной коры и мантии требует существенного уточнения старых данных и получения большого количества новой информации.