

Е. Н. ЛЮСТИХ

РАСЧЕТЫ ДЛЯ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ

(Представлено академиком М. А. Садовским 10 VI 1974)

Гипотеза, именуемая «тектоникой плит» (ТП) состоит, по существу, из двух гипотез: гипотезы спрединга, согласно которой плиты литосферы зарождаются в линейной зоне по оси срединноокеанического хребта и раздвигаются от нее (мы будем называть эту зону линией раздвигания — ЛР), и гипотезы субдукции, согласно которой многие плиты, дойдя до глубоководных желобов, загибаются вниз и уходят наклонно под островные дуги вдоль сейсмических зон Бенюфа (мы будем называть такие желоба линиями поглощения — ЛП). Для объяснения ТП предложены две гипотезы: 1) конвекция (тепловая или химическая) в мантии увлекает за собой плиту, которая движется, таким образом, пассивно; 2) причиной движения является погружение плиты в ЛП под действием избыточного веса плиты; погружающаяся часть плиты тянет за собой горизонтальную часть. Назовем эту гипотезу «гипотезой активной субдукции».

Будем все время рассматривать двухмерную задачу для плоской Земли. Используем формулы для ламинарного течения ньютоновой жидкости под действием силы тяжести между двумя параллельными плоскими наклонными стенками, из которых одна неподвижна, а другая движется (¹) со скоростью v_0 (коллинеарной скорости течения). Будем отсчитывать координату z перпендикулярно стенкам от неподвижной стенки в сторону подвижной. Обозначим H — расстояние между стенками, \bar{v} — средний расход жидкости на единицу площади сечения, перпендикулярного течению (численно \bar{v} равно средней скорости течения), g — ускорение силы тяжести, η — вязкость жидкости, ρ — ее плотность, $\zeta = z/H$. Тогда скорость течения $v = 2(3\bar{v} - v_0)\zeta - 3(2\bar{v} - v_0)\zeta^2$. Максимальная скорость достигается при $\zeta = \zeta_m = (3\bar{v} - v_0) / [3(2\bar{v} - v_0)]$ и равна $v_m = (3\bar{v} - v_0)\zeta_m$. Угол (малый) падения стенок $\varphi = -6\eta(2\bar{v} - v_0) / (g\rho H^2)$. Диссипация энергии в силу вязкого трения в расчете на единицу площади одной стенки $w = 4\eta(3\bar{v}^2 - 3\bar{v}v_0 + v_0^2) / H$.

Согласно гипотезе конвекции, ЛП должна проходить в месте встречи двух горизонтальных потоков, где нисходящий поток идет вертикально, и, следовательно, плита литосферы тоже должна погружаться вертикально; скорость потока здесь должна совпадать со скоростью плиты v_0 . Мы примем эти условия (хотя они не совпадают с обычной схемой ТП). Вязкость астеносферы гораздо ниже вязкости мантии под ней, поэтому верхний горизонтальный поток конвекции должен сосредоточиться в астеносфере. Для простоты будем рассматривать в астеносфере только горизонтальную составляющую скорости, а непосредственно под астеносферой — только вертикальную составляющую v_z . Мы приняли, что максимальное значение v_z совпадает со скоростью движения плиты v_0 , поэтому примем у подошвы астеносферы $v_z = v_0 \cos(\pi x/L)$, где x — горизонтальное расстояние от ЛР и L — ширина плиты (от ЛР до ЛП). Тогда в единицу времени в астеносферу входит объем $q = \int_0^{L/2} v_z dx = Lv_0/\pi$ на участке $0 < x < L/2$; весь этот объем уходит из нее на следующем участке, и, следовательно, весь он проходит через сечение астеносферы $x = L/2$, а через любое вертикальное сечение проходит объем $q \sin(\pi x/L)$, так что $\bar{v} = (q/H) \sin(\pi x/L)$. Однако верхний горизон-

тальный поток конвекции может течь только благодаря наклонному положению его кровли (²) (точнее, нижней поверхности равного давления в литосфере). Отсюда $\varphi = -6\eta v_0 [2\lambda \sin(\pi x/L) - 1] / (g\rho H^2)$, где $\lambda = L/(\pi H)$. Это дает разность высот между ЛП и ЛР

$$\Delta = \int_0^L \varphi dx = -\frac{12\eta\lambda v_0}{g\rho H} \left(2\lambda - \frac{\pi}{2}\right).$$

Если плита покрыта водой, то разность высот увеличивается до значения $\Delta^* = (\rho - \rho_0) \Delta / \rho$, где ρ_0 — плотность воды.

Разность высот должна вызвать соответствующую разность изостатических аномалий. Однако эти аномалии вряд ли можно будет обнаружить, так как они наложатся на аномалии, создаваемые разностью плотностей, порождающей конвекцию.

Вязкое трение в астеносфере приводит к выделению тепла, которое должно все уходить наверх, в особенности если конвекция тепловая. Максимальная мощность выделения тепла должна наблюдаться в сечении $x=L/2$; здесь $\xi_m = (3\lambda - 1)/(6\lambda - 3)$, $v_m = v_{mm} = (3\lambda - 1)\xi_m v_0$ и $w = w_m = 12\eta v_0^2 (\lambda^2 - \lambda + 1/3)/H$.

Изучая историю изостатического поднятия Фенноскандии и других тектонических структур, Е. В. Артюшков установил (^{3, 4}), что под материками толщина астеносферы невелика — около 100—200 км, а величина $C = g\rho H^2 / (12\eta)$ приблизительно равна 0,5 м²/сек. Мы примем $g\rho = 3,45 \cdot 10^8$ кг/(м²·сек²) и для материка $H = 200$ км; отсюда $\eta = 4,6 \cdot 10^{19}$ н·сек/м² = $4,6 \cdot 10^{20}$ пз. Примем океаническую литосферу тоньше материковой на 50 км, а подошву астеносферы для простоты будем считать горизонтальной под всей плитой. Отсюда для океана $H = 250$ км. В конвективном потоке вязкость под океаном и под материком можно считать одинаковой. Выполним расчеты для четырех моделей.

Модель 1. Чисто океаническая плита, $v_0 = 2 \cdot 10^{-9}$ м/сек = 6,3 см/год, $L = 10\,000$ км. В этом случае $\lambda = 12,7$, $\Delta = -39$ км, $v_{mm} = 38 \cdot 10^{-9}$ м/сек = 119 см/год, $w_m = 1,3$ вт/м²; значения Δ и w_m явно абсурдны (средний поток тепла из Земли 0,06 вт/м²).

Модель 2. Тоже океаническая плита, $v_0 = 1 \cdot 10^{-9}$ м/сек, $L = 6000$ км. Это дает: $\Delta = -6,7$ км, $w_m = 0,11$ вт/м². Цифры все еще слишком велики и явно не соответствуют действительности (такой высокий поток тепла по середине между ЛР и ЛП не наблюдается).

Модель 3. Тоже океаническая плита, $v_0 = 0,5 \cdot 10^{-9}$ м/сек, $L = 6000$ км. Это дает: $\Delta = -3,35$ км, $\Delta^* = -4,7$ км, $w_m = 0,028$ вт/м². Абсолютная величина Δ^* больше обычной высоты океанических хребтов; кроме того, все сторонники ТП утверждают, что срединноокеанические хребты возвышаются за счет повышенной толщины разогретой литосферы, а не за счет поднятия ее подошвы. Величина w_m , по-видимому, должна добавляться к нормальному тепловому потоку; в действительности в соответствующих частях океанов поток тепла обычно ниже нормы.

Модель 4. Половина плиты, примыкающая к ЛР, — океаническая, примыкающая к ЛП, — материковая, $v_0 = 0,5 \cdot 10^{-9}$ м/сек, $L = 6000$ км. В этом случае для материковой части $\Delta = -3,35$ км, для океанической $\Delta^* = -2,35$ км, что в сумме дает $-5,7$ км. Под материком $w_m = 0,057$ вт/м², под океаном $w_m = 0,028$ вт/м². Разность высот явно не соответствует действительности, величина w_m для материка тоже неприемлема.

Таким образом, если верны принятые нами параметры и схема, конвекция не может быть причиной ТП. По-видимому, наиболее неопределенным параметром является вязкость астеносферы под океаном. Если допустить вязкость на порядок меньше при той же толщине астеносферы, то для моделей 2 и 3 получаются приемлемые цифры, но модели 1 и 4 по-прежнему будут расходиться с действительностью. Поэтому гипотезу конвек-

ции надо считать вообще непригодной для объяснения ТП. К такому же заключению приводят и многие другие соображения, в частности уже указанное несоответствие между наклонным положением зоны субдукции и вертикальностью нисходящего потока конвекции.

Для гипотезы активной субдукции мантию ниже астеносферы можно принять неподвижной, но верхняя часть астеносферы в силу вязкого трения должна увлекаться движущейся плитой. Встречая на своем пути препятствие в виде внедряющейся в мантию плиты в зоне субдукции, этот поток астеносферного материала вынужден поворачивать обратно, образуя таким образом «противоток» в нижней части астеносферы. Общий расход равен нулю, и мы должны положить $\bar{v}=0$. (Форристал (5) принимает, что, кроме увлеченного плитой астеносферного материала, через астеносферу возвращается и весь материал плиты, так что $\bar{v}=-hv_0/H$, где h — толщина литосферы. Однако обычно в ТП этого не предполагается.) Получаем $v=(3\xi^2-2\xi)v_0$, $\xi_m=1/3$, т. е. противоток занимает нижние две трети астеносферы, $v_m=-v_0/3$, $\varphi=6\eta v_0/(g\rho H^2)$, $w=4\eta v_0^2/H$, $\Delta=L\varphi$. В данном случае φ и Δ положительны, так как для создания противотока требуется наклон от ЛП к ЛР. Для преодоления вязкого трения в литосфере между ЛР и ЛП должна быть создана разность давлений Lw/hv_0 ; кроме того, чтобы тащить плиту вверх по уклону φ , необходима добавочная разность давлений $g\rho_1\Delta$, где ρ_1 — средняя плотность литосферы. В сумме получаем разность давлений (усредненную по вертикали)

$$\sigma = \frac{2\eta Lv_0}{H^2} \left(2 \frac{H}{h} + 3 \frac{\rho_1}{\rho} \right).$$

Разность высот Δ должна создать соответствующую разность изостатических аномалий, которую можно приближенно оценить величиной $\delta g = 2\eta f \Delta$, где f — гравитационная константа.

Примем для оксанической литосферы $h=70$ км и, для простоты, $\rho_1=\rho$. Для тех же моделей получаем:

Модель 1: $\Delta^*=3,6$ км, $\delta g=376$ мгал, $w=2,9 \cdot 10^{-3}$ вт/м², $\sigma=3,0 \cdot 10^8$ н/м² = 3 кбар.

Модель 2: $\Delta^*=1,08$ км, $\delta g=113$ мгал, $w=7,4 \cdot 10^{-4}$ вт/м², $\sigma=9,0 \cdot 10^7$ н/м².

Для обеих моделей значения Δ^* и δg непомерно велики.

Модель 3: $\Delta^*=0,54$ км, $\delta g=56$ мгал, $w=1,8 \cdot 10^{-4}$ вт/м², $\sigma=4,5 \cdot 10^7$ н/м². Значение δg тоже явно не соответствует наблюдениям.

Для модели 4 вычислений не производим, так как в ТП субдукция материковой литосферы не предусматривается.

Итак, при принятых нами параметрах гипотеза активной субдукции тоже не согласуется с наблюдениями. Снижение вязкости астеносферы на порядок делает приемлемыми все модели, кроме первой. Но для этой гипотезы возможны и другие численные проверки.

Для активной субдукции необходимо, чтобы плита литосферы, изогнувшись вниз и погружаясь, сохраняла бы свою целостность и прочность. Следует проверить, возможно ли это. Прежде всего надо принять во внимание, что плита представляет собой не плоский, а сферический слой. Прогнуться внутрь такой слой может только одним способом, если поставить условие, чтобы не было значительных деформаций сдвига, растяжения или сжатия, а именно, он может образовать вогнутость внутрь с тем же радиусом кривизны, как и у самого слоя. Отсюда нетрудно вывести, что радиус дуги (на поверхности Земли) глубоководного желоба ξ , выраженный в градусах, и угол падения зоны Бенюфа близ поверхности Земли ψ должны быть связаны соотношением $\psi=2\xi$. Легко проверить, что в действительности это соотношение совершенно не соблюдается; следовательно, плита, погружаясь, должна испытывать заметные деформации. Еще убедительней против гипотезы активной субдукции свидетельствует расчет для изгибания плиты вниз у желоба. По расположению очагов землетрясений (6) видно,

что радиус кривизны нижней поверхности плиты здесь не превышает 200 км. При толщине плиты 70 км это означает, что ее верхняя поверхность растягивается, а нижняя сжимается относительно средней поверхности на 15% или больше. Между тем, материал литосферы не может выдержать без потери прочности деформацию более 1—2%. Значит, сохранить прочность может только «шейка» толщиной 5—10 км. Тогда усиление растяжения, создаваемое в ней уходящим вниз материалом плиты, увеличивается на порядок, и она неизбежно разорвется тоже. Таким образом, плита будет разрушена, прекратится воздействие ее погружающейся части на горизонтальную часть, а обломки погружающейся части, по законам физики, будут тонуть вертикально.

Подводя итоги, мы присоединяемся к утверждению Камминза (7), что гипотеза, связывающая ЛП с зонами Беньофа, по-видимому, неверна. Для зон Беньофа следует искать другие объяснения, а сторонникам спрединга можно, в духе идей, высказанных В. С. Сафроновым (8) и автором (9), предложить нижеследующую гипотетическую схему. Допустим, что вообще литосфера немного легче астеносферы и не может тонуть в ней. Но в геосинклинальные области поступает с большой глубины горячий кислый материал (10—12); прощитывая (или оттесняя) астеносферу, он снижает ее плотность настолько, что субстрат (подкоровая часть литосферы) тонет в ней, и на его место с обеих сторон надвигаются прилегающие плиты, сминавая в складки кору, которая не тонет. Субстрат тонет вертикально, до какой глубины — неясно. Вероятно, возможны и другие предположения.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
24 IV 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Н. Люстих, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1 (1960). ² Е. Н. Люстих, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5 (1957). ³ Е. В. Аргюшков, Физика Земли, № 1 (1967).
⁴ Е. В. Аргюшков, J. Geophys. Res., v. 76, № 5 (1971). ⁵ G. Z. Forristall, J. Geophys. Res., v. 77, № 32 (1972). ⁶ Р. З. Тараканов, Сборн. Земная кора островных дуг и дальневосточных морей, М., 1972. ⁷ W. A. Cummins, Tectonophysics, v. 12, № 4 (1971). ⁸ В. С. Сафронов, Физика Земли, № 7 (1972). ⁹ Е. Н. Люстих, Сов. геол., № 6 (1961). ¹⁰ Г. Д. Ажгирей, Изв. АН СССР, сер. геол., № 3 (1971). ¹¹ Ю. М. Шейнманн, Г. И. Балжнова, Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 47, в. 3 (1972). ¹² Ю. М. Шейнманн, Земля и Вселенная, № 3 (1972).