

И.Л. ГУФЕЛЬД

МЕХАНИЗМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЛИТОСФЕРЫ

(Представлено академиком М.А. Садовским 23 IX 1985)

Наблюдаемая сопряженность областей современных активных движений и сейсмичности с зонами повышенных тепловых потоков дает основание предполагать, что активизация движений литосферы в значительной мере определяется появлением у ее подошвы мощных тепловых источников. Какова реакция литосферы на появление таких источников, например огромных масс легкого и нагретого материала, выделившегося из мантии? Если механизмы вертикальных движений могут быть объяснены в общих чертах (схема В.В. Белоусова), то способы реализации больших горизонтальных движений литосферы не очевидны. При обсуждении механизмов горизонтальных движений литосферы основными являются вопросы природы сил и процессов, обеспечивающих долговременное и направленное перемещение плит. В настоящее время наиболее широко обсуждаются три типа сил, вызывающих горизонтальные движения литосферы: силы вязкого трения, возникающие на подошве литосферы со стороны вовлекаемой мантийными течениями в горизонтальное движение астеносферы; сила тяги погружающейся в мантию в районе желобов океанической литосферы; силы, действующие при горизонтальном растекании плотностных неоднородностей коры. Хотя процессы, вызывающие эти силы, относят к физически реальным, их роль в активизации горизонтальных движений литосферы остается для многих спорной. Представляет интерес продолжить обсуждение возможной природы этих сил.

В настоящей работе рассмотрен механизм горизонтальных движений литосферы, обусловленный развитием диффузионных процессов массопереноса в ней. Литосфера представляется однородной и однофазной. Рассматривается массоперенос на основе вакансионного механизма диффузии, хотя в сложной по составу и структуре земной коре возможны и другие механизмы.

Перейдем к описанию механизма движения без детализации (рис. 1). Всплывание легкого и нагретого материала из мантии вызовет расплавление подошвы литосферы, ее поднятие, деформацию и соответствующее утонение, т.е. уменьшение мощности. При этом температура нижней части литосферы повысится, что приведет к ее разуплотнению. В области разуплотнения концентрация вакансий окажется повышенной, следовательно, начнется их диффузия в основном к подошве окружающей литосферы, где температура и скорость диффузии выше. В обратном направлении будет происходить перенос вещества. Этот поток вещества будет стремиться уменьшить степень термического разуплотнения области. Однако термическое разуплотнение поддерживается независимым тепловым источником. Поэтому реакцией области разуплотнения на поступление в нее вещества будет увеличение объема за счет термического расширения. Таким образом, на границе области возникнут силы растяжения F_n . Описанный процесс в стационарном режиме равносителен застройке веществом боковых границ области разуплотнения. Причем начальный граничный слой области разуплотнения начнет отодвигаться в горизонтальном направлении при последующем поступлении в область нового вещества и ее термическом рас-

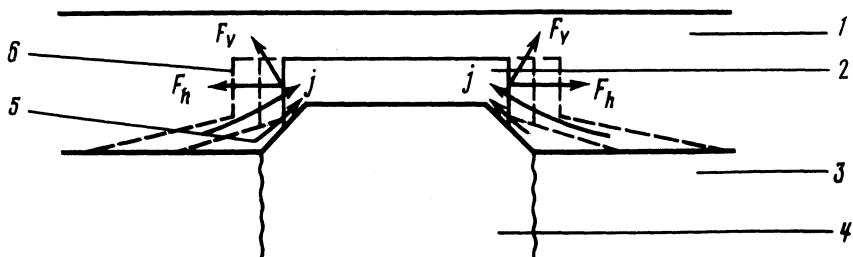


Рис. 1. Схема процесса массопереноса и действующих сил: 1 – литосфера; 2 – область разуплотнения; 3 – астеносфера; 4 – легкое и нагретое вещество, выделившееся из мантии; 5 – направление переноса вещества; 6 – подвижная граница области разуплотнения

ширении. Скорость перемещения граничных слоев будет контролироваться скоростью переноса вещества в область разуплотнения.

Оценку скорости переноса вещества в область разуплотнения V можно получить на основе теории Херринга. Движущей силой массопереноса являются градиенты температуры или напряжений. Массоперенос, обусловленный градиентом температуры, заметен лишь при $\nabla T > 10^4$ К/м, который в условиях литосферы не реализуется. Наиболее реален массоперенос, вызванный градиентом напряжений, возникающим за счет различия в мощностях и плотностях литосферы области разуплотнения и окружающей ее зоны.

Поток атомов в область разуплотнения будет равен

$$j = \frac{ND\nabla\mu}{kT}.$$

Так как $\nabla\mu = \Omega\sigma/l$, $N = 1/\Omega$, то

$$V = \frac{D\Omega\sigma}{kT},$$

где $\nabla\mu$ – градиент химического потенциала, D – коэффициент самодиффузии атомов, N и Ω – соответственно число атомов в единице объема и атомный объем, σ – напряжение, l – характерный размер, соответствующий диаметру зерен.

Для значений $D \approx 10^{-9} - 10^{-11}$ см²/с, $\Omega = 10^{-23}$ см³, $T = 1000$ К, $\sigma \approx 10^8 - 10^9$ дин/см² (0,1–1 кбар), $l \approx 10^{-2} - 10^{-4}$ см получим

$$V \approx 10^{-4} - 10^1 \text{ см/год.}$$

Полагая, что температура области разуплотнения превышает окружающую на 10–100 градусов, коэффициент объемного расширения и модуль Юнга среды равны соответственно 10^{-5} 1/К и 10^{12} дин/см², получим напряжения на границе области порядка $10^8 - 10^9$ дин/см². При мощности области разуплотнения 10 км действующая на единицу длины области разуплотнения сила растяжения достигнет величины

$$F_h \approx 10^{14} - 10^{15} \text{ дин/см.}$$

Для возбуждения горизонтальных движений литосферных плит тепловой источник (или их совокупность) должен иметь достаточную линейную протяженность, а силы растяжения – превышать силу вязкого трения литосферы относительно астеносферы F_v и силу трения F_t , возникающую на границах плит. По Е.В. Артюшкову, $F_v \sim 10^{14} - 10^{15}$ дин/см и $F_t \sim 10^{15}$ дин/см, оценки которых сделаны при следующих параметрах: коэффициент вязкости астеносферы $10^{20} - 10^{21}$ П, ско-

рость движения плит ~ 1 см/год, длина плиты 5000 км, длина зоны взаимодействия плит в области субдукции ~ 700 км. Следовательно, суммарная сила торможения, рассчитанная также на единицу длины, перпендикулярной направлению движения, оказывается порядка силы растяжения. Это дает основание полагать возможным возбуждение горизонтальных движений литосферы за счет диффузионных процессов массопереноса. При этом рассчитанные и наблюдаемые скорости горизонтальных движений одного порядка.

В рамках модели следующим образом представляется последовательность развития в литосфере процессов, вызывающих горизонтальные перемещения плит:

1. Появление протяженных тепловых источников под литосферой — уменьшение мощности литосферы над источником — начало процессов массопереноса — появление сил растяжения — начало движения плит — слабое растрескивание коры над тепловым источником.

2. Сквозное растрескивание коры над тепловым источником — выход расплавленного вещества на поверхность и его кристаллизация в трещинах и на поверхности — формирование новой коры (зоны так называемого спрединга; в модели зона спрединга является "пассивным окном", через которое расплавленный материал вытекает на поверхность) — активное движение плит — формирование рельефа поверхности из-за временного увеличения сил трения на границах плит.

3. Замедление движения плит и образование поднятий типа срединно-океанических хребтов (за счет ограничения движения плит на границах или начала истощения действия тепловых источников).

4. Истощение действия тепловых источников — прекращение движения плит.

Примером такого развития процессов может быть, на наш взгляд, раскрытие Атлантического океана. Подчеркнем, что долговременность и направленность горизонтальных движений плит будут определяться периодом существования тепловых источников, величиной силы трения на границах плит и блоков, а также зависеть от появления аналогичных тепловых источников под соседними областями плит. В последнем случае может найти объяснение миграция срединно-океанических хребтов, сформировавшихся на более ранних стадиях.

В тех случаях, когда тепловой источник действует в условиях ограниченных горизонтальных движений, массоперенос приведет к появлению сил F_V , направленных преимущественно вертикально (рис. 1). С этими силами будет связано формирование рельефа поверхности.

В рамках диффузионной модели могут найти объяснение и процессы формирования зон субдукции. Как известно, в областях активных окраинных бассейнов зафиксированы повышенные тепловые потоки. Следовательно, в этих областях литосферы появится зона разуплотнения, активизируются процессы массопереноса, а на границах зоны возникнут силы растяжения. Эти силы могут привести к раскрытию окраинных морей и надвигу части континентов (в настоящее время это островные дуги) на океаническую литосферу.

В заключение отметим, что резкие различия мощности континентальной и океанической литосферы также стимулируют процессы массопереноса вещества, в основном из подошвы континентальной в океаническую литосферу. При застройке границы континентальной и океанической литосфер возникнут напряжения, релаксация которых возможна за счет вертикальных или горизонтальных движений. Однако преимущественное направление движений здесь можно определить лишь с учетом рассматриваемых движущих сил, действующих как в районах тепловых источников, так и на близких и дальних границах континент — океан.