

А. В. КАРАКИН, И. В. КАЛАШНИКОВА,
член-корреспондент АН СССР В. А. МАГНИЦКИЙ

ОБ ЭФФЕКТАХ «СМАЗОЧНОГО СЛОЯ», ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЛИТОСФЕРЫ

На основании представлений о существовании в мантии Земли астеносферного слоя с пониженной вязкостью (¹⁻³) в длинноволновом приближении решается краевая гидродинамическая задача о течении вязкого слоя (астеносферы) при горизонтальном перемещении кровли (литосферы) относительно подошвы (мантии). Нижняя граница Γ_1 предполагается жесткой, для верхней границы астеносферы Γ_2 предусмотрено два случая: случай жесткой литосферы и случай литосферы, разбитой на блоки, вертикальные и горизонтальные размеры которых одного порядка.

В области длинноволновой асимптотики уравнения гидродинамики слоя записываются в так называемом приближении «смазочного слоя» (⁴). Впервые это приближение предложил для описания постгляциальных движений земной коры Е. В. Артюшков (²). Им же предложена используемая ниже аппроксимация литосферы, разбитой на отдельные блоки, тяжелой гибкой несжимаемой пленкой. Вопрос о возмущениях напряжений, вызванных горизонтальным перемещением литосферы, впервые был поставлен в работе (⁵).

1. Будем пренебрегать кривизной сферических оболочек Земли, плотности литосферы ρ_1 и астеносферы ρ_2 будем считать постоянными. Координатную плоскость (x, y) совместим с границей Γ_1 , которая предполагается плоской, ось z направим вертикально вверх. Пусть ξ_i — возмущения границ Γ_i , $i=1, 2, 3$ (Γ_3 — земная поверхность), т. е.

$$h = h_0 + \xi_2 - \xi_1, \quad H = H_0 + \xi_3 - \xi_2;$$

здесь h , h_0 (H , H_0) — истинная и средняя толщина астеносферы (литосферы).

Положим

$$\xi_i = \xi_i' + \xi_i'', \quad i=2, 3;$$

компоненты ξ_i'' задают рельеф границ Γ_2 и Γ_3 при отсутствии смещений жестких блоков, а компоненты ξ_i' описывают малые относительные смещения блоков:

$$\xi_i' = \xi_i'(x, y), \quad \xi_i'' \ll \xi_i', \quad i=2, 3, \quad (1,1)$$

$$\xi_2''(x, y, t) = \xi_3''(x, y, t) = \xi''(x, y, t).$$

При условии прилипания на обеих границах в приближении «смазочного слоя» для вязкой ньютоновской несжимаемой жидкости выведены следующие уравнения:

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \frac{\partial p'}{\partial y}, \quad \tau_{xx} \sim \tau_{yy} \sim \tau_{zz} \ll \tau_{xz}, \tau_{yz}; \quad (1,2)$$

$$\frac{\partial \xi''}{\partial t} - \frac{1}{12\eta_1} \operatorname{div}(h^3 \operatorname{grad} p') = \frac{1}{2} \operatorname{div}(hu), \quad (1,3)$$

$$p = \rho_1 g H_0 + \rho_2 g (h_0 - z) + p'(x, y, t);$$

здесь τ_{ij} — девиатор напряжений, p — давление, p' — возмущение давления, вызванное отклонением от состояния гидростатического равновесия, η — коэффициент вязкости.

Из уравнений (1, 2) следует, что

$$\tau_{xz} \sim \tau_{yz} \sim \epsilon p', \quad \epsilon = h_0/l, \quad (1,4)$$

где l — характерный горизонтальный размер возмущения границ.

Соотношение (1,4) означает, что возмущение гидростатического давления в астеносфере на порядок превышает величину девиатора напряжений; это один из эффектов «смазочного слоя», а именно, эффект расклинивающего действия смазки.

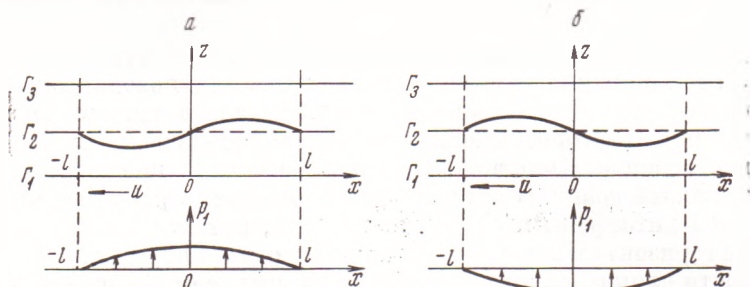


Рис. 1. Распределение сил, действующих на подошве литосферы в случае неоднородности h , состоящей из последовательно чередующихся утолщения и утончения

2. Для жесткой литосферы $\zeta'' = 0$ и уравнение (1,3) упрощается:

$$\operatorname{div} (h^3 \operatorname{grad} p') = -6\eta_1 \operatorname{div} (hu). \quad (2,1)$$

Интегрируя (2,1) при соответствующих краевых условиях, можно вычислить p' и остальные величины. В качестве примера на рис. 1 дано распределение p' для плоского течения и двух следующих одна за другой изолированных неоднородностей границы Γ_2 при плоской границе Γ_1 и граничных условиях $p' = 0$ при $x = \pm l$.

Главной особенностью течения при горизонтальном перемещении жесткой литосферы является наличие мощных перерезывающих сил, стремящихся раздробить литосферу на отдельные блоки и сдвинуть их один относительно другого. Возможно, именно по этой причине литосфера в настоящее время представляет собой конгломерат отдельных блоков, а не сплошной монокристаллический слой. Разрывы литосферы и возобновление древних частично залечившихся разломов должны сопровождаться тектоническими землетрясениями.

Для того чтобы получить замкнутые уравнения при относительных смещениях блоков, необходимо задать закон трения на границах их соприкосновения. В частном случае, когда силой трения можно пренебречь, баланс сил для каждого блока с вертикальными торцевыми границами в длинноволновом приближении приводит к соотношению

$$\rho_1 g \zeta'' = p',$$

подставляя которое в (1,3) получаем

$$\frac{\partial \zeta''}{\partial t} - \frac{\rho_1 g}{12\eta_1} \operatorname{div} (h^3 \operatorname{grad} \zeta'') = -1/2 \operatorname{div} (hu). \quad (2,2)$$

При поступательном перемещении литосферы u не зависит от x и y и

$$\operatorname{div} (hu) = (u \operatorname{grad} h).$$

Если принять $\eta_1 \sim 10^{-19} - 10^{22}$ пуаз, $|u| \sim 1 - 10$ см/год, $\xi'' \sim 10^3 - 10^4$ см, то при сравнительной оценке второй член левой части (2,2) колеблется от величины того же порядка, что и остальные члены, до пренебрежимо малой величины. Особый интерес представляет случай, когда вторым членом (2,2) можно пренебречь (это всегда соблюдается в начале процесса). Тогда имеем

$$\partial \xi'' / \partial t = 1/2 (u \operatorname{grad} h). \quad (2,3)$$

Некоторые авторы отождествляют астеносферу со слоем повышенной электропроводности, лежащим на глубине около 100 км. Поскольку верхняя граница этого слоя определяется методом магнитотеллурических токов (6), то в рамках данных представлений уравнение (2,3) позволяет

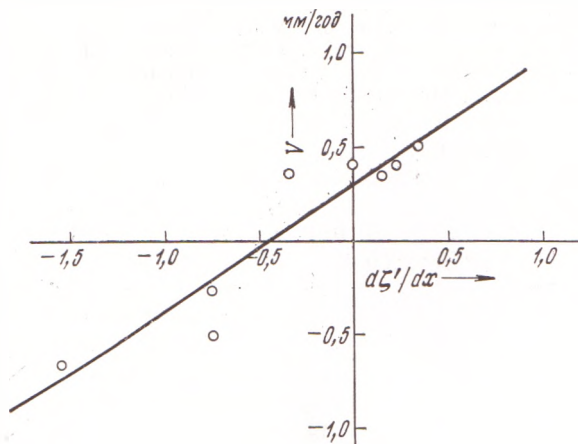


Рис. 2. Зависимость между вертикальной компонентой v скорости земной поверхности и наклоном $\partial \xi' / \partial x$ рельефа границы Γ_2

произвести сопоставление с результатами геофизических измерений. Формула (2,3) позволяет найти проекцию вектора u на направление $\operatorname{grad} h$ (при условии $\xi_2 \gg \xi_1$), а при сложном рельефе границы Γ_2 и достаточно точном количестве измерений — и сам вектор u .

Для оценки применимости соотношения (2,3) использованы данные о скоростях $v = \partial \xi'' / \partial t$ современных вертикальных движений блоков земной коры, полученные для южных частей ЧССР и данные о наклонах кровли слоя высокой электропроводности в верхней мантии Земли (7). Результаты приведены на рис. 2 (значения v усреднены по некоторой площади, наклоны $\partial \xi_2 / \partial x$ — вдоль линии, направление которой предполагается совпадающим с направлением $\operatorname{grad} \xi_2$, что заранее, вообще говоря, не было известно). Полученные точки достаточно удовлетворительно группируются около некоторой прямой, что является обнадеживающим результатом, учитывая низкую точность измерений и грубость исходных предпосылок.

3. Некоторые механические и физико-химические процессы, происходящие в верхней мантии Земли, такие, как гравитационная конвекция, дифференциация вещества, фазовые переходы, эффекты теплового расширения, могут привести к смещению границ астеносферного слоя, поступлению нового вещества в астеносферу и изменению толщины и реологических свойств слоя. При этом сложные и разнообразные по физической природе явления допускают сравнительно простое и эффективное рассмотрение в рамках механики вязкого слоя в длинноволновом приближении, если в поставленной выше задаче соответствующим образом изменить граничные условия на границе Γ_1 . Разумно предположить, что некоторые наблюдаемые тектонические движения земной поверхности связа-

ны с эффектами «смазочного слоя» в астеносфере. Аппарат краевой задачи может быть использован для анализа различных концепций современной тектоники, предполагающих значительные горизонтальные и вертикальные смещения литосферных блоков.

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

Поступило
23 V 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Е. В. Артюшков, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 8 (1966). ² Е. В. Артюшков, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 1 (1967). ³ D. L. Anderson, C. Sammis, Phys. Earth Planet. Interiors, 3, 41 (1970). ⁴ Н. А. Слезкин, Динамика вязкой жидкости, М., 1955. ⁵ И. В. Калашникова, В. А. Магницкий, В. А. Сидоров, VI Всесоюз. совещ. по современным движениям земной коры, Тез. докл., Таллин, 1972. ⁶ U. Schmucker, J. Jankowski, The Upper Mantle, Amsterdam — London — N. Y., 1972. ⁷ P. Vyskočil, Comparison of Two Maps of Annual Speeds of Vertical Crustal Movements on the Territory of CSSR, Prague, 1971.