

УДК 550.311

## ДИНАМИКА ПОГРУЖАЮЩЕЙСЯ ЛИТОСФЕРЫ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗОНАХ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОЛЛИЗИИ

© 2004 г. А. Т. Исмаил-заде

Представлено академиком В.И. Кейлис-Бороком 09.10.2003 г.

Поступило 15.10.2003 г.

Понимание процессов генерации тектонических напряжений, их локализации и сброса имеет принципиально важное значение в геодинамике и сейсмологии. Основными регионами сброса напряжений являются зоны субдукции и континентальной коллизии (Тихоокеанский и Альпийско-Гималайский сейсмические пояса соответственно). Установлено, что в зонах активной субдукции сейсмические события в основном приурочены к верхней поверхности зоны Вадати–Беньоффа [1], тогда как в зонах континентальной коллизии (например, в районе Вранча на юго-востоке Карпат [2, 3] или в центральной части Апеннин [4]) – к ее нижней поверхности. В данном сообщении дается возможное объяснение изменений в пространственной локализации напряжений и связанных с ними землетрясений.

Землетрясения, в результате которых происходит сброс тектонических напряжений, приурочены в основном к областям высоких сдвиговых напряжений. Рассматривается модель вязких течений и напряжений, наведенных движущейся плитой (corner flow model) [5]. Данная модель впервые была применена к зонам активной субдукции и продемонстрировала связь между тектоническими напряжениями и сейсмическими событиями в зоне субдукции [6]. Кроме того, данная модель использовалась для изучения угла субдукции в случае ньютоновской [7] и неньютоновской реологии мантии [8].

Погружающаяся литосферная плита генерирует вязкие напряжения в окружающей ее мантии. Основными факторами, определяющими движение погружающейся плиты, являются градиент давления между верхней и нижней поверхностями плиты, вязкие напряжения и гравитация. Хотя силы сопротивления вносят вклад в оценку сдвиговых напряжений, эти силы не учитываются

в последующем анализе. Также не рассматриваются тепловые эффекты. Перечисленные предположения сильно упрощают динамику мантии Земли, однако позволяют найти аналитическое решение задачи о вязких мантийных течениях и понять возможные причины изменения напряженного состояния мантии в районах континентальной коллизии.

Рассматривается двумерное течение мантии. Погружающаяся плита разделяет мантию на две области, в каждой из которых течение стимулируется движением плиты (рис. 1). Центр зоны коллизии в модели располагается в начале координат  $x_1 = x_2 = 0$ ; оси  $0x_1$  и  $0x_2$  направлены налево и вниз соответственно. Границы  $x_2 = 0, x_1 < 0$  и  $x_2 = 0, x_1 \geq 0$  движутся в направлении к центру зоны коллизии ( $x_1 = 0$ ) с постоянной скоростью  $U_1$  и  $-U_2$  соответственно. Плита погружается в мантию под углом  $\alpha$  к положительной части оси  $x_1$  с постоянной скоростью  $U_3$  или  $U_4$ .

Компоненты скорости ( $v_1, v_2$ ) мантийных течений и максимум сдвиговых девиаторных напряжений  $\tau_{\max}$  в каждой подобласти находятся из решения уравнения Стокса [5]:

$$v_1 = -(A_i x_1 + B_i x_2) \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2} - B_i \arctg \frac{x_2}{x_1} - D_i,$$

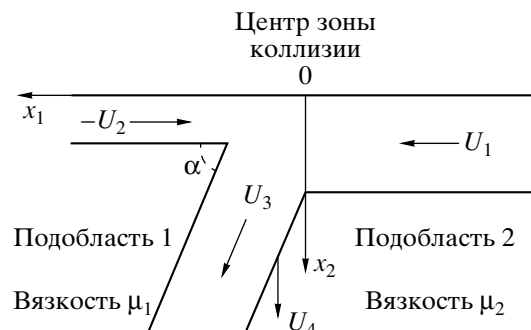


Рис. 1. Геометрия области и приложенные силы в модели погружающейся литосферной плиты.

$$v_2 = -(A_i x_1 + B_i x_2) \frac{x_2}{x_1^2 + x_2^2} + A_i \operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} + C_i,$$

$$\tau_{\max} = 2\mu_i \frac{|A_i x_2 - B_i x_1|}{x_1^2 + x_2^2},$$

где  $\mu_i$  – вязкость;  $A_i, B_i, C_i$  и  $D_i$  – постоянные величины; индексы  $i = 1$  и  $i = 2$  относятся к подобласти 1 и 2 соответственно. Значения этих постоянных величин определяются из граничных условий.

На границе подобласти 1 имеем  $v_1 = -U_2$  и  $v_2 = 0$  при  $x_2 = 0, x_1 > 0$  (или  $\operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} = 0$ ) и  $v_1 = U_3 \cos \alpha,$

$v_2 = U_3 \sin \alpha + U_4$  при  $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha$  (или  $\operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} = \alpha$ ).

Величины  $A_1, B_1, C_1, D_1$  находятся из этих граничных условий:

$$A_1 = \frac{-U_2 \sin^2 \alpha + U_3 \alpha \sin \alpha + U_4 (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha)}{\alpha^2 - \sin^2 \alpha},$$

$$B_1 =$$

$$= \frac{-U_2 (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) - U_3 (\alpha \cos \alpha - \sin \alpha) + U_4 \sin^2 \alpha}{\alpha^2 - \sin^2 \alpha},$$

$$C_1 = 0, \quad D_1 = -A_1 + U_2.$$

На границе подобласти 2:  $v_1 = U_1, v_2 = 0$  при  $x_2 = 0,$

$x_1 < 0$  (или  $\operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} = \pi$ ) и  $v_1 = U_3 \cos \alpha, v_2 =$

$= U_3 \sin \alpha + U_4$  при  $x_2 = x_1 \operatorname{tg} \alpha$  (или  $\operatorname{arctg} \frac{x_2}{x_1} = \alpha$ ).

Подставляя эти граничные условия в уравнения для скоростей, получаем следующие значения величин  $A_2, B_2, C_2, D_2$ :

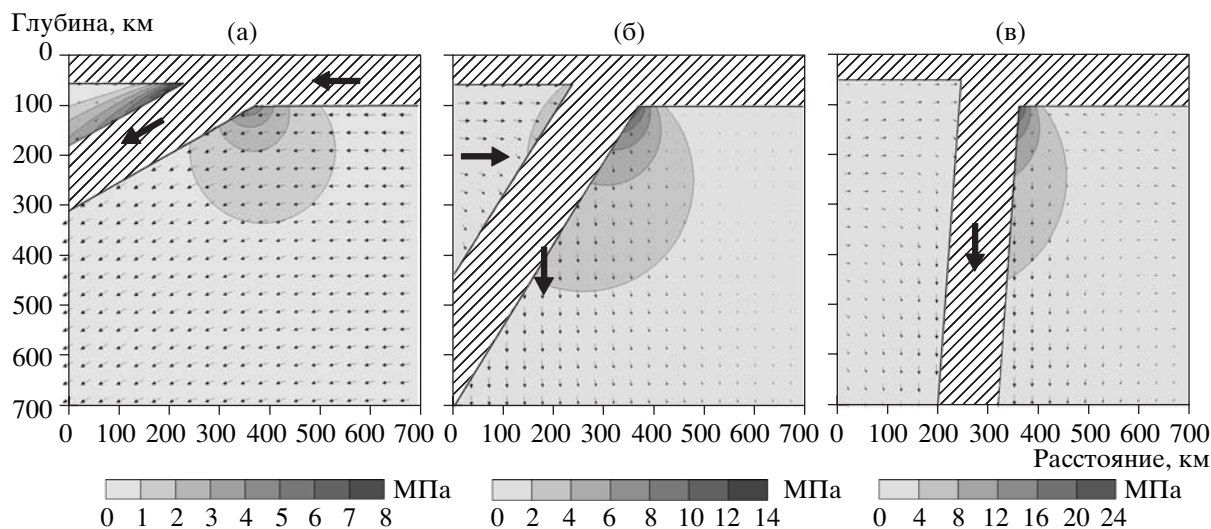
$$A_2 = \frac{U_1 \sin^2 \alpha - U_3 (\pi - \alpha) \sin \alpha - U_4 (\pi - \alpha - \sin \alpha \cos \alpha)}{(\pi - \alpha)^2 - \sin^2 \alpha},$$

$$B_2 = \frac{-U_1 (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha) - U_3 (\cos \alpha (\pi - \alpha) + \sin \alpha) + U_4 \sin^2 \alpha}{(\pi - \alpha)^2 - \sin^2 \alpha},$$

$$C_2 = -\pi A_2, \quad D_2 = -A_2 - \pi B_2 - U_1.$$

Вязкость мантии в подобласти 1 ( $\mu_1 = 2 \cdot 10^{20}$  Па · с) в 5 раз меньше вязкости мантии в подобласти 2 ( $\mu_2 = 10^{21}$  Па · с). Разные значения вязкости в подобластях модели объясняются тем, что в ре-

зультате плавления пород погружающейся плиты и высвобождения воды эффективная вязкость мантии в подобласти 1 может существенно понизиться.



**Рис. 2.** Максимальные тектонические сдвиговые напряжения (изолинии) и поле скоростей (векторы) в предложенной модели для трех фаз эволюции этой плиты: а – субдукция как результат активной коллизии; б – погружение плиты после прекращения активной коллизии; в – погружение плиты только за счет сил гравитации. Жирные стрелки указывают направления скоростей, приложенных к плите; штриховка представляет величину максимальных сдвиговых напряжений.

Выделяются три основные фазы эволюции погружающейся плиты в зонах континентальной коллизии: 1) субдукция как результат активной коллизии ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $U_1 = U_3 = 5 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$ ); 2) погружение плиты после прекращения активной коллизии ( $\alpha = 60^\circ$ ,  $U_2 = U_4 = 5 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$ ); 3) погружение плиты только за счет сил гравитации ( $\alpha = 85^\circ$ ,  $U_4 = 5 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$ ). На рис. 2 представлены поле скоростей и изолинии максимальных сдвиговых напряжений, предсказанных данной моделью.

Структура мантийного течения и локализация напряжений на первой фазе эволюции погружающейся плиты в зонах континентальной коллизии (рис. 2а) соответствуют таковым в случае активной океанической субдукции [6], а именно, максимальные напряжения концентрируются у верхней поверхности погружающейся плиты. После прекращения активной коллизии литосферная плита, погружающаяся в поле силы тяжести, стремится изменить угол наклона и принять вертикальное положение. Максимальные сдвиговые напряжения при этом мигрируют с верхней на нижнюю поверхность литосферной плиты (рис. 2б). На финальной стадии эволюции погружающейся плиты тектонические напряжения на нижней поверхности увеличиваются в несколько раз (рис. 2в).

Таким образом, изменение скоростей, приложенных к погружающейся плите, приводит к изменению напряженного состояния мантии. Такое изменение в структуре мантийных напряжений может объяснить локализацию среднефокусных землетрясений у нижней поверхности сейсмической зоны Вадати–Беньоффа в районах древней коллизии (например, юго-восточные Карпаты [9, 10]). Хотя предложенная модель является упрощенной моделью динамики литосферы и мантии,

она иллюстрирует, как изменяется пространственное распределение сдвиговых тектонических напряжений (и отсюда сейсмичность) в результате эволюции погружающейся плиты в районах континентальной коллизии.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН “Глубинное строение Земли, геодинамика, магматизм и взаимодействие геосфер”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao D. // Phys. Earth and Planet. Inter. 2001. V. 127. P. 197–214.
2. Wortel M.J.R., Spakman W. // Science. 2000. V. 290. P. 1910–1917.
3. Ismail-Zadeh A.T. Stress and seismicity in areas of descending relic slabs. Pt 1. The southeastern Carpathians. Lect. Notes. The Abdus Salam ICTP. Trieste, 2003. H4.SMR/1519-4. 56 p.
4. Ismail-Zadeh A.T. Stress and seismicity in areas of descending relic slabs. Pt 2. The central Apennines. Lect. Notes. The Abdus Salam ICTP. Trieste, 2003. H4.SMR/1519-5. 19 p.
5. Batchelor G.K. An introduction to fluid dynamics. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1967. 615 p.
6. McKenzie D.P. // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. London. 1969. V. 18. P. 1–32.
7. Stevenson D.J., Turner J.S. // Nature. 1977. V. 270. P. 334–336.
8. Tovish A., Schubert G., Luyedyk B.P. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 5892–5898.
9. Ismail-Zadeh A.T. In: Risk Science and Sustainability. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003. P. 149–162.
10. Ismail-Zadeh A.T., Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. // Phys. Earth and Planet. Inter. 1999. V. 111. P. 267–274.