

М. М. Довбнич

Влияние вариаций ротационного режима Земли и лунно-солнечных приливов на напряженное состояние тектоносферы

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины К. Ф. Тяпкиным)

A technique and results of the estimation of the stress state of the tectonosphere produced by variations of the rotational regime and the lunar-solar influence are considered. The quantitative characteristics of the stress produced by cosmogonic factors are given.

Современные астрономические и геодезические наблюдения регистрируют вариации скорости вращения и изменения положения оси вращения в теле Земли. Палеомагнитные, палеоклиматические и палеонтологические исследования свидетельствуют о вековом затухании скорости вращения и дрейфе оси вращения в геологическом прошлом. При изменении ротационного режима Земля вынуждена менять свою форму, приспособляясь к новому равновесному состоянию. Наряду с вариациями ротационного режима, определенные изменения фигуры Земли будут вызывать лунно-солнечные приливы.

На протяжении всей истории геотектонических исследований многие исследователи (Б. П. Личков, М. В. Стовас, В. А. Цареградский и др.) рассматривали влияние космогонических факторов как основную причину тектогенеза Земли. Эти же процессы лежат в основе Новой ротационной гипотезы структурообразования, предложенной К. Ф. Тяпкиным [1]. В работе [2] авторы отмечают, что вращение Земли является реальным источником энергии ее тектогенеза, при этом расходование энергии на тектонические перестройки регулируется законами взаимодействия нашей планеты с окружающими ее физическими полями Космоса, приводящими к вариациям ее ротационного режима. На сегодняшний день накоплен значительный объем исследований, позволяющих утверждать о том, что космогонические факторы оказывают существенное влияние на тектогенез Земли. Не случайно, одна из тематик юбилейного XL тектонического совещания [3, 4] была посвящена роли ротационного и космического факторов в энергетике тектогенеза. Необходимо отметить, что особенности ротационного режима Земли, хотя и являются планетарным процессом, тем не менее обусловлены космическими причинами [5].

Целью настоящей работы является численная оценка роли космогонических факторов на тектогенез Земли. Ниже рассмотрены результаты расчетов напряженного состояния тектоносферы, обусловленного вариациями скорости вращения, дрейфом оси вращения и лунно-солнечными приливами. Напряженное состояние — важнейшая характеристика геологической среды, определяющей развитие геотектонических процессов, анализ именно этой характеристики позволяет дать ответ на вопрос о роли космогонических факторов в тектогенезе планеты.

В настоящей работе проанализировано влияние пяти факторов на напряженное состояние тектоносферы, а именно: вековое затухание скорости вращения Земли, вековой дрейф

оси вращения в теле Земли, короткопериодные вариации скорости вращения, чандлеровские колебания полюсов и лунно-солнечные приливы. Для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния тектоносферы было разработано два подхода. Первый — позволяет рассчитывать напряжения в вязкоупругой тонкой оболочке и может быть использован при анализе длиннопериодных во времени процессов, для которых оказывается невозможным пренебрегать процессами ползучести и релаксации; данный подход имеет и свои недостатки, заключающиеся в ряде серьезных допущений и ограничений относительно вычисления напряженного состояния. Алгоритм, положенный в основу данного подхода, описан в работе [6], останавливаться на его деталях в настоящей статье не будем. Во втором подходе реализован алгоритм расчета напряжений в толстостенной упругой оболочке, позволяющий анализировать все элементы тензора напряжений, но в силу более сложной реализации не дает на сегодняшний день возможность расчета в рамках вязкоупругих моделей, что позволяет его использование лишь при анализе короткопериодных процессов.

Таким образом, первый подход, хотя и дает ограниченную информацию о тензоре напряжений, оказывается незаменим при моделировании полей напряжений, обусловленных вековым затуханием скорости вращения Земли и вековым дрейфом оси вращения в теле Земли. В то время как второй подход корректно использовать при численной оценке напряженного состояния тектоносферы под действием короткопериодных вариаций скорости вращения, чандлеровских колебаний полюсов и лунно-солнечных приливов.

Ниже рассмотрены основные положения второго подхода.

Рассмотрим оболочку, внешняя поверхность которой задана в криволинейных координатах (α_1, α_2) . При этом в декартовой системе координат внешняя поверхность может быть задана тремя координатами:

$$x = x(\alpha_1, \alpha_2), \quad y = y(\alpha_1, \alpha_2), \quad z = z(\alpha_1, \alpha_2).$$

Три скалярных уравнения можно заменить одним векторным $\vec{r} = \vec{r}(\alpha_1, \alpha_2)$.

Предположим, что под влиянием каких-либо воздействий оболочка деформировалась, т. е. изменила свою первоначальную форму. Пусть при этом вектор $\vec{u}(\alpha_1, \alpha_2) = u_1 \vec{e}_1 + u_2 \vec{e}_2 + \varpi \vec{n}$ описывает перемещение произвольной точки m , лежащей на внешней поверхности оболочки. Компоненты u_1 и u_2 вектора перемещений \vec{u} будем называть тангенциальными смещениями, а компоненту ϖ — нормальным смещением. Через m_1 обозначим точку оболочки, расположенную до деформации на перпендикуляре к внешней поверхности в точке m и удаленную от последней на расстояние h . Пусть перемещение точки m_1 описывается вектором $\vec{u}^h = u_1^h \vec{e}_1 + u_2^h \vec{e}_2 + \varpi^h \vec{n}$.

Сделаем допущение, что прямолинейные волокна, перпендикулярные к внешней поверхности оболочки, остаются после деформации перпендикулярными к изогнутой внешней поверхности, сохраняя при этом свою длину. Данное допущение аналогично гипотезе Кирхгофа, широко используемое в теории пластин и оболочек применительно к деформируемой срединной поверхности [7]. В соответствии со сделанным допущением, вектор mm_1 после деформации переходит в вектор, перпендикулярный к деформированной внешней поверхности, не изменяя своей длины h . Если обозначить вектор нормали к деформационной поверхности в точке m_1 через \vec{n}^* , то смысл сделанного допущения заключается в том, что $h\vec{n}$ переходит в $h\vec{n}^*$. Не трудно показать, что

$$h\vec{n} + \vec{u}^h = \vec{u} + h\vec{n}^* \quad \text{или} \quad \vec{u}^h = \vec{u} + h(\vec{n}^* - \vec{n}). \quad (1)$$

Уравнение деформированной внешней поверхности примет вид

$$\vec{r}^*(\alpha_1, \alpha_2) = \vec{r}(\alpha_1, \alpha_2) + \vec{u}(\alpha_1, \alpha_2).$$

Таким образом, в качестве криволинейных координат деформированной поверхности можно рассматривать все те же α_1 и α_2 на деформированной внешней поверхности.

Остановимся более детально на законе изменения вектора смещения с глубиной. Пренебрегая произведениями перемещений и их производными как величинами второго порядка малости, можно показать, что сделанное допущение о деформировании оболочки приводит к линейному закону изменения смещений по толщине оболочки, причем нормальное смещение не зависит от h .

Зная величину вектора смещений $\vec{u}(\alpha_1, \alpha_2)$ на поверхности оболочки, нормали к поверхности оболочки до \vec{n} и после \vec{n}^* деформирования, компоненты которых несложно вычислить, зная уравнение внешней поверхности оболочки до $\vec{r}(\alpha_1, \alpha_2)$ и после $\vec{r}^*(\alpha_1, \alpha_2)$ деформации, появляется возможность определить вектор смещений $\vec{u}(\alpha_1, \alpha_2)$ в любой точке по толщине оболочки. Данный факт крайне важен, так как нам известны именно величины смещений физической поверхности Земли под действием космогонических факторов.

Сделаем допущения относительно величины вектора смещений и его направления. Руководствуясь [8], не трудно показать, что в первом приближении форма деформированной поверхности определяется нормальными перемещениями лежащих на ней частиц. Таким образом, допустим, что на поверхности деформируемой оболочки модуль вектора смещений равен величине $|\vec{u}| = \xi = |r^*(\alpha_1, \alpha_2) - r(\alpha_1, \alpha_2)|$ и ориентирован по нормали к внешней поверхности деформируемой оболочки.

Зная компоненты вектора смещения $\vec{u}(\alpha_1, \alpha_2)$ в любой точке на поверхности и, согласно (1), по толщине оболочки, их дифференцированием можно определить компоненты тензора деформаций ξ_{ij} , и далее, на основании закона Гука для изотропной упругой среды, полученные деформации перевести в элементы тензора напряжений σ_{ij} [9].

Рассмотрим случай деформирования оболочки, внешняя поверхность которой представляет собой эллипсоид вращения малого сжатия. Положение точек на поверхности и по толщине оболочки будем определять их широтой φ и долготой λ . Выделим в оболочке элемент в виде параллелепипеда, размеры которого Δx , Δy , Δz выберем таким образом, чтобы в его пределах можно было пренебрегать сферичностью земной поверхности. Ориентировку элемента сделаем следующей — две боковые грани параллельны меридиану, проходящему по центру внешней поверхности элемента. Для рассматриваемого элемента введем связанную с ним систему прямоугольных координат: ось Y расположим вдоль меридиана, проходящего через центр элемента, ось X перпендикулярна Y в плоскости земной поверхности, ось Z — “вниз”, перпендикулярно внешней поверхности. Определив координаты (широту и долготу) точек, лежащих на гранях выделенного элемента, определяем в них компоненты вектора смещения \vec{u} , а затем, воспользовавшись конечно-разностными аналогами производных, определяем элементы тензора деформаций в центральной точке рассматриваемого элемента оболочки, через которые с помощью закона Гука находим элементы тензора напряжений. Все определения выполняются в системе координат XYZ , жестко связанной с рассматриваемым элементом, при этом, в силу малости Δx , Δy , Δz , будем считать напряжения, действующие на грани, перпендикулярной оси X , — меридиональными, на грани, перпендикулярной оси Y , — широтными, на грани, перпендикулярной оси Z , — нормальными.

Зная элементы тензора напряжений, не составляет труда рассчитать характеристики, инвариантные выбору системы координат, и которые, в свою очередь, будут отражать основ-

ные особенности напряженного состояния. В качестве таких величин могут быть использованы, например, максимальные горизонтальные напряжения сжатия-растяжения и максимальные вертикальные касательные напряжения.

Важным этапом при расчете напряжений является определение численных значений физико-механических параметров тектоносферы. В случае вековых вариаций скорости вращения и векового дрейфа оси вращения, расчеты выполнялись в рамках вязкоупругой среды, в реологическом отношении ведущей себя как тело Максвелла с вязкостью 10^{24} Па·с, как уже отмечалось, алгоритм расчета для такой модели описан в [6]. Для остальных факторов ползучестью и релаксацией пренебрегалось, использовалось упругое решение, описанное выше. При этом были приняты следующие значения упругих модулей: модуль Юнга $E = 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

Остановимся более детально на характеристике полей напряжений, полученных в ходе численных расчетов для различных факторов.

Изменения скорости вращения Земли и дрейф оси вращения в теле Земли. При изменении ротационного режима Земля вынуждена менять свою форму, приспосабливаясь к новому ротационному режиму. Верхняя оболочка Земли деформируется по следующей схеме [5]: изменению угловой скорости вращения будет соответствовать новый геоид с другим значением сжатия ϵ ; новому положению оси вращения Земли будет соответствовать новый геоид с тем же самым коэффициентом сжатия ϵ , но расположенным относительно нового положения оси вращения. При расчетах было сделано следующее допущение: как бы не изменялась скорость вращения, и на какой бы угол не происходило отклонение оси вращения в теле планеты, внешняя оболочка Земли деформируется настолько, что ее фигура соответствует фигуре равновесия вращающейся неоднородной жидкости для данной угловой скорости вращения. Алгоритмы определения величины вектора смещений поверхности земного эллипсоида, вследствие вариаций скорости вращения и дрейфа оси вращения, детально описаны в работах [6, 10].

Следуя [6], в ходе векового линейного затухания скорости вращения Земли, вызванного приливным трением и проявляющимся в удлинении суток на $2 \cdot 10^{-5}$ с/год, поле напряжений в тектоносфере будет характеризоваться следующими особенностями. При принятом затухании угловой скорости процесс накопления напряжений продолжается примерно до 1 млн лет, после чего напряжения за счет процессов релаксации не увеличиваются, создавая в оболочке постоянное во времени поле напряжений ($\sim 10^5$ Па). При этом в верхней оболочке планеты возникает три зоны: две растяжения ($+90^\circ - \approx +35^\circ$, $-90^\circ - \approx -35^\circ$) и одна сжатия ($\approx -35^\circ - \approx +35^\circ$). Максимальные растягивающие напряжения будут на полюсах, а сжимающие на экваторе.

В современную эпоху отмечают различного периода отклонения земных суток от эталонных с максимальной амплитудой $\pm 0,003 - 0,004$ с. Анализ возникающих при этом полей напряжений, полученных в результате упругого решения, описанного выше, позволяет утверждать, что, как и в случае тонкой вязкоупругой оболочки, будут иметь место равные широтные и меридиональные напряжения сжатия-растяжения, зоны сжатия и растяжения также будут граничить по широте $\pm 35^\circ$, однако при этом появляется возможность оценки вертикальных касательных напряжений. В случае вариации длительности суток в 0,003 с, в тектоносфере возникает осесимметричное поле напряжений, сечение которого вдоль меридиана приведено на рис. 1. Как видно, горизонтальные напряжения сжатия-растяжения достигают $4 \cdot 10^2$ Па и имеют максимальные значения на полюсах и экваторе; вертикальные касательные — $0,8 \cdot 10^2$ Па достигают максимальных значений на широте $\pm 45^\circ$.

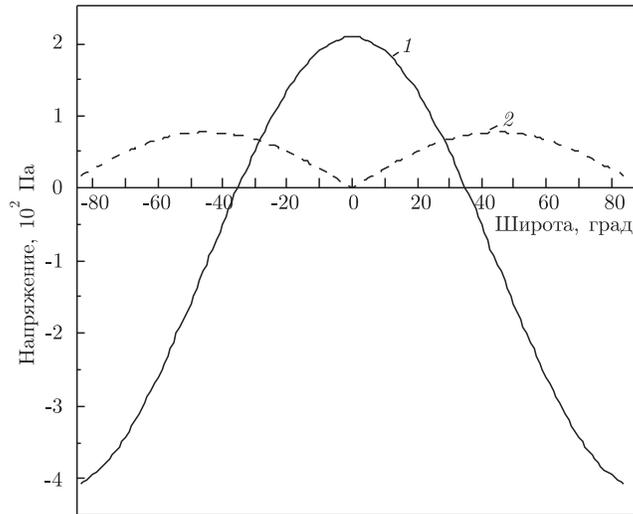


Рис. 1. Кривые максимальных напряжений сжатия-растяжения (1) и максимальных вертикальных касательных напряжений (2) (10^3 Па) при изменении продолжительности суток на 0,003 с

В случае векового дрейфа оси вращения в меридиональной плоскости в двух квадрантах верхней оболочки планеты возникают зоны сжатия, а в двух других — растяжения. На процесс накопления напряжений в верхней оболочке планеты существенное влияние, наряду с угловым перемещением оси вращения в теле Земли, оказывает скорость перемещения. В соответствии с результатами, полученными в работе [6], можно сделать следующее заключение: для современного эллипсоида при скоростях дрейфа $> 1,8$ град/млн лет напряжения достигнут величины $\geq 10^7$ Па при угловом перемещении оси вращения Земли \approx на 1° в плоскости меридиана.

Моделирование полей напряжений, возникающих под действием периодических изменений положения географических полюсов — чандлеровских колебаний, выполнялось в рамках упругой модели тектоносферы.

Как и в случае тонкой оболочки, при решении данной задачи в более общем случае, при смещении географических полюсов по поверхности Земли в двух квадрантах верхней оболочки планеты возникают зоны сжатия, а в двух других — растяжения, при этом положение областей максимального сжатия и растяжения аналогично ранее рассмотренному случаю. При смещении полюсов на $0,5''$ в тектоносфере будут возникать горизонтальные напряжения сжатия-растяжения до $3 \cdot 10^3$ Па (рис. 2, а). Необходимо отметить, что при решении данной задачи в рамках толстостенной оболочки появляется возможность анализа вертикальных касательных напряжений. Для рассматриваемой величины дрейфа максимальные вертикальные касательные напряжения будут достигать величины $0,8 \cdot 10^3$ Па и будут приурочены к областям сочленения зон сжатия и растяжения (рис. 2, б).

Лунно-солнечные приливы. В случае лунно-солнечных приливов в качестве величины вектора смещений было принято приливное возмущение, которое может быть определено, согласно статической теории приливов [11]. Подставляя величину приливного возмущения ξ , определенного в предположении, что возмущающее тело лежит в плоскости экватора Земли, в алгоритм расчета напряжений, получаем значения тензора напряжений в тектоносфере, обусловленного лунно-солнечными приливами. На рис. 3 представлены результаты расчетов напряженного состояния под действием лунных приливов.

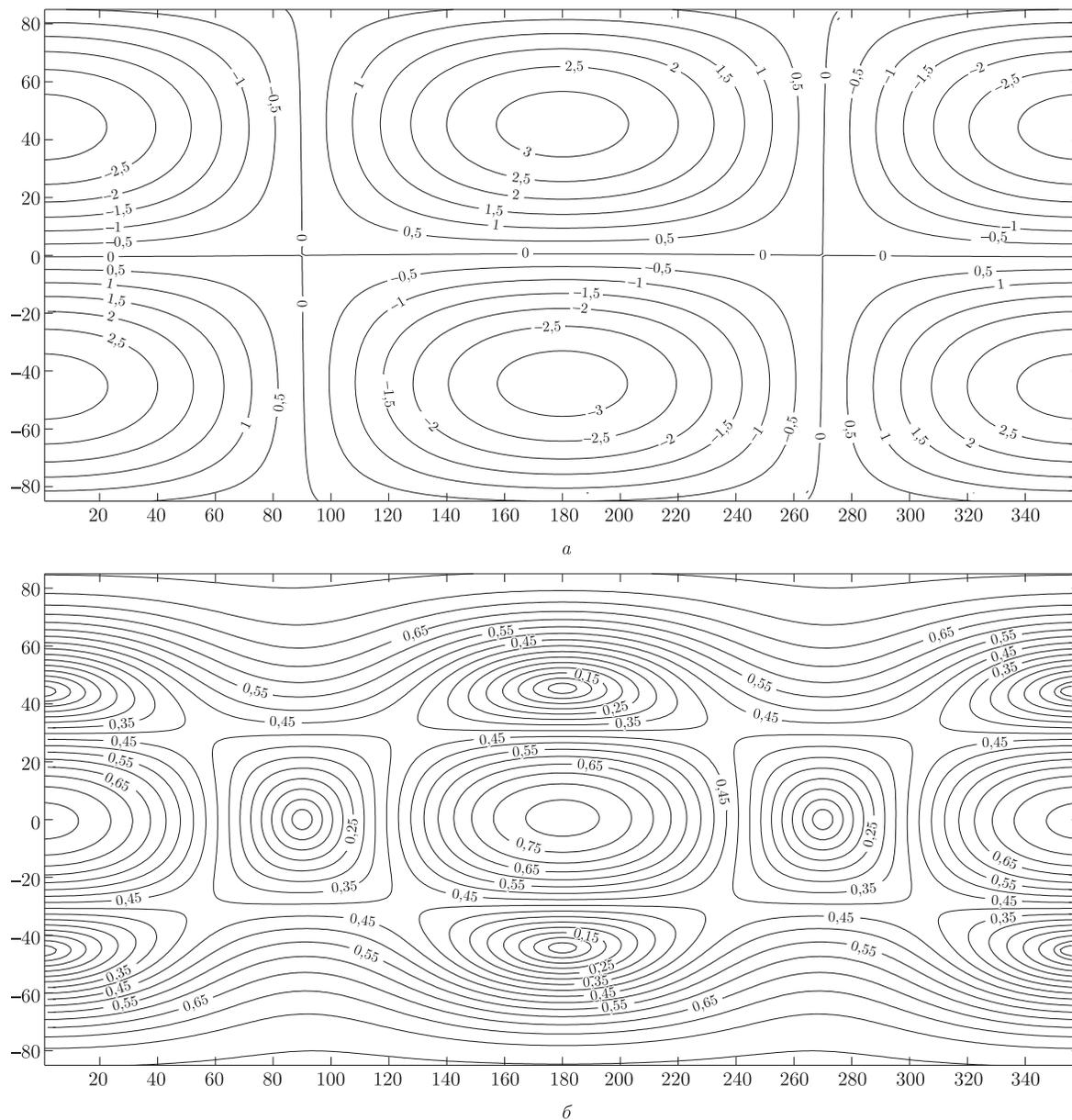


Рис. 2. Распределение максимальных горизонтальных напряжений сжатия-растяжения (а) и максимальных вертикальных касательных напряжений (б) (10^3 Па) в верхней оболочке планеты, возникающих при дрейфе оси вращения в плоскости нулевого меридиана на $0,5''$

Как показывают результаты расчетов, максимальные растягивающие напряжения имеют величину $2,24 \cdot 10^4$ Па, сжимающие напряжения — $1,12 \cdot 10^4$ Па, максимальные вертикальные касательные напряжения — $0,42 \cdot 10^4$ Па. Для солнечных приливов: максимальные растягивающие напряжения имеют величину $1,03 \cdot 10^4$ Па, сжимающие напряжения — $0,51 \cdot 10^4$ Па, максимальные вертикальные касательные напряжения — $0,19 \cdot 10^4$ Па.

Выполненные расчеты позволяют сделать заключение о величинах напряжений, возникающих при вариациях ротационного режима и лунно-солнечных приливах. Наибольший вклад в напряженное состояние земной коры оказывает вековое смещение оси вращения

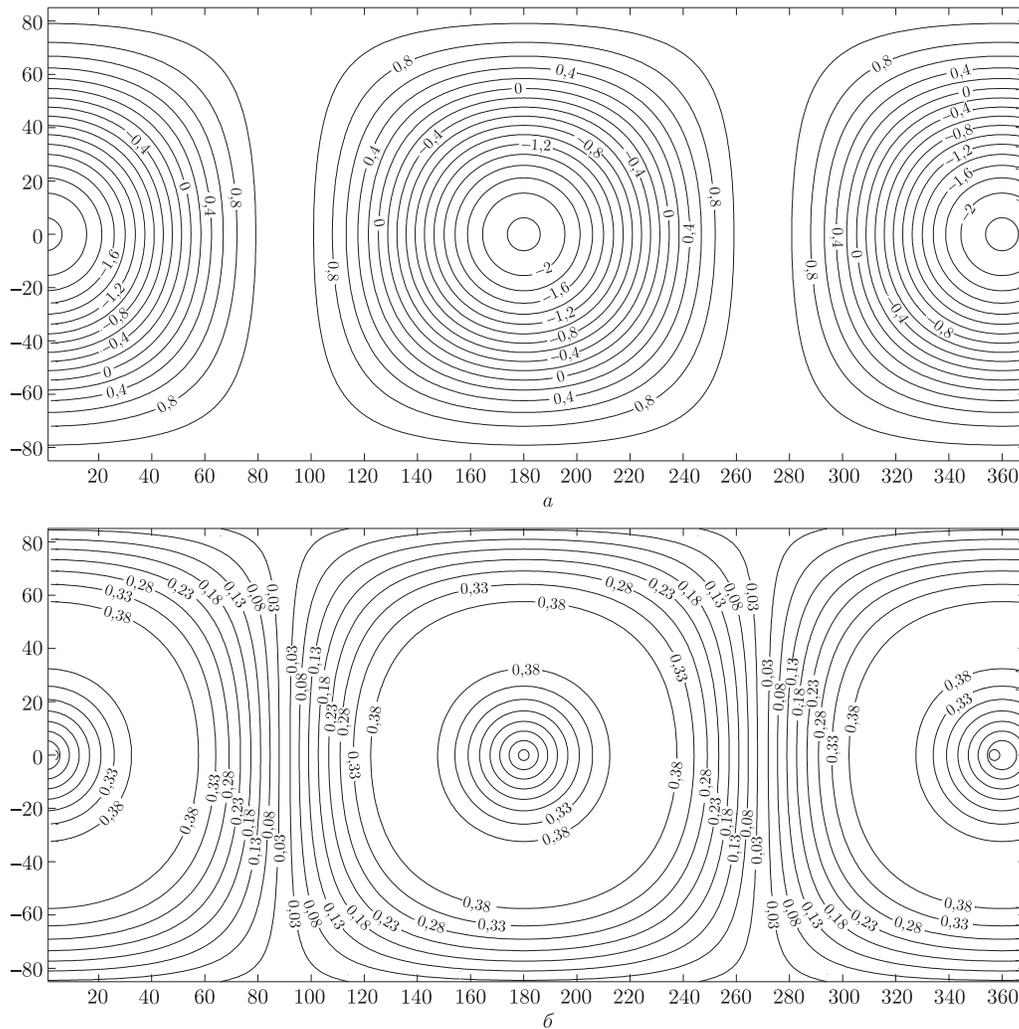


Рис. 3. Распределение в тектоносфере максимальных горизонтальных напряжений сжатия-растяжения (а) и максимальных касательных напряжений в вертикальной плоскости (б) (10^4 Па), возникающих под действием лунных приливов

в теле Земли (10^7 Па), затем вековое затухание скорости вращения Земли (10^5 Па), далее лунно-солнечные приливы (10^4 Па), чандлеровские колебания полюса (10^3 Па) и короткопериодные вариации скорости вращения (10^2 Па). Безусловно, полученные результаты сильно зависят от выбора механической модели тектоносферы и ее физико-механических параметров, а также допущений, сделанных при выполнении расчетов. Тем не менее они позволяют дать ответ о роли космогонических факторов в тектогенезе Земли. Полученные результаты могут быть использованы как для решения фундаментальных вопросов геотектоники и физики Земли, так и для изучения природы и последующего прогноза геодинамических процессов в земной коре.

1. Тяпкин К. Ф. Новая ротационная гипотеза формирования тектонических структур в земной коре // Геол. журн. – 1974. – 34, № 4. – С. 3–16.
2. Тяпкин К. Ф., Довбнич М. М. Вращение Земли – единственный реальный источник энергии ее тектогенеза // Геофизика. – 2007. – № 1. – С. 59–64.

3. *Фундаментальные* проблемы геотектоники : Материалы XL Тектонического совещания. Т. 1. – Москва: ГЕОС, 2007. – 424 с.
4. *Фундаментальные* проблемы геотектоники : Материалы XL Тектонического совещания. Т. 2. – Москва: ГЕОС, 2007. – 408 с.
5. *Тяпкин К. Ф.* Физика Земли. – Киев: Вища шк., 1998. – 312 с.
6. *Тяпкин К. Ф., Довбнич М. М.* О напряжениях, возникающих в тектоносфере в результате изменения ротационного режима упруговязкой Земли // Геофиз. журн. – 2002. – № 2. – С. 52–60.
7. *Ляв А.* Математическая теория упругости. – Ленинград: ОНТИ, 1935. – 674 с.
8. *Колтунов М. А., Кравчук А. С., Майборода В. П.* Прикладная механика деформируемого твердого тела. – Москва: Высш. шк., 1983. – 349 с.
9. *Лурье А. И.* Теория упругости. – Москва: Наука, 1970. – 939 с.
10. *Довбнич М. М.* Деформации земного эллипсоида, обусловленные короткопериодными вариациями ротационного режима // Зб. наук. праць НГУ, № 23. – Дніпропетровськ, 2005. – С. 23–27.
11. *Мельхиор П.* Земные приливы. – Москва: Мир, 1968. – 482 с.

Національний горний університет,
Дніпропетровськ

Поступило в редакцію 17.04.2007

УДК 553.411.071(571.5)

© 2007

Академик НАН Украины **Е. А. Кулиш, С. Г. Парада**

Гидротермально-осадочные образования в золотоносных черносланцевых комплексах

Underwater hydrothermal-sedimentary bodies within auriferous black schist complexes by the (Fe+Mn)/Ti module are determined. They are presented by numerous small interbeds and rare layers and lenses of the quartz and sulfide-quartz compositions enriched with Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Au, and other elements.

При оценке роли эндогенного материала в золотоносных черносланцевых толщах обычно учитываются, прежде всего, маломощные пласты, прослой, и линзы зеленокаменных пород и зеленых сланцев основного состава. В некоторых из них многими геологами отмечаются реликты диабазовой структуры. В связи с этим все подобные образования принято считать метаморфизованными производными базитовой магмы. По оценке геологов-съемщиков, количество основных метавулканитов в черносланцевых толщах Амуро-Охотской складчатой области составляет не более 10–15%, причем распространены они, главным образом, в нижней половине разреза. В других регионах (Верхояно-Колымская, Ленская, Енисейская, Южно-Тянь-Шаньская и др. провинции) не отмечается вулканитов основного состава в разрезах золотоносных черносланцевых толщ.

Иногда предполагается наличие пластов кислых вулканитов или примеси туфового материала в самих черносланцевых породах. Так, например, на основании результатов петрохимических пересчетов, предполагается наличие метавулканитов кислого состава в низах