Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, XXXVI, № 6, 3—14, 1983

УДК: 551.242.5.056

А. Т. АСЛАНЯН

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРИТЕРИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Если рассматривать литосферу как несжимаемую оболочку на текучем субстрате и допустить, что она подвергается короблению и деструкции вследствие гравитационного сжатия Земли и расчленяется при этом на n одинаковых блоков (плиты, геоблоки), то простейшей стилизованной моделью турбулентности будет поднятие («через одну») половины множества этих плит ($n/2$) и погружение другой половины множества ($n/2$). Такая картина сходна с упрощенной схемой конвекции в мантии из n ячеек. Далее, если рассматриваемый контракционный механизм коробления литосферы является причиной чандлеровских колебаний полюса (попеременное нарастание и релаксация напряжений с характерным временем затухания $\tau = 13$ лет) и изменения неприливного компонента скорости вращения Земли m_3, то необходимые для количественной оценки критерия турбулентности $m_1/m_3 = \sqrt{3}P/2 \approx P$ параметры будут определяться на основе известного значения среднеквадратичной величины смещения полюса $m_1 = \Delta a = 7{,}06 \cdot 10^{-7}$ *рад*, $m_3 = f\Delta a = 2{,}31 \cdot 10^{-9}$ за 13 лет (f — динамическое сжатие Земли, равное 1/305,51) и значения периода свободной нутации оси Земли, $P = 2\pi/\Omega$, определяемого из квадратного уравнения $(\Omega - f\omega) \cdot (\Omega + \omega) = 0$. Согласно предложенному В. Мунком и Р. Ревелем (1952) критерию, относительно большие значения P характеризуют турбулентность (хаотичность) движения геоблоков, а относительно малые значения, наоборот, указывают на отсутствие заметной турбулентности. Для малого корня $P = P_1 = -2\pi/\Omega_1 = 2\pi/\omega$ ($\omega = 2\pi/T$ — угловая скорость суточного движения Земли, T — продолжительность суток), $P_1 = T \sim 24$ *ч.* (квазисуточная или резонансная нутация) и $m_1/m_3 \approx 1$ (вращательно-гироскопический момент, связанный с периодом $P_1 \cong 1$ сутки, компенсирован противоположно направленным магнитным прецессионным моментом Земли); для второго большого корня $P = P_2 = 2\pi/\Omega_2$, $\Omega_2 = f\omega$. $P = P_2 = 2\pi/f\omega = 305{,}5$ сутки (период эйлеровой нутации для абсолютно твердой Земли); для реальной Земли $P = 434$ сутки (период чандлеровской нутации), $m_1/m_3 \approx 434$ и, следовательно, литосферные блоки в этом случае находятся в состоянии турбулентности. В таком же плане могут рассматриваться конвективные течения в мантии, поддерживаемые, главным образом, тепловой энергией гравитационного сжатия (фазовые переходы и другие) Земли. Согласно зависимости $2\Delta R/R = m_1/P$ при $P = 434$, $R = 6371$ *км*, $m_1 = 7{,}06 \cdot 10^{-7}$ *рад*, $\tau = 13$ лет уменьшение радиуса Земли составляет для современной эпохи 4 *см* за 100 лет. Этому значению ΔR соответствует уменьшение больших кругов литосферы для фанерозойского времени на 1500 *км* (вследствие изгибов, субдукции, смятий и т. д.)

В работе, посвященной интерпретации неравномерностей вращения Земли, Мунк и Ревель [19] сформулировали понятие «турбулентность материков» и установили критерий, определяющий возможность возникновения турбулентности вертикально перемещающихся блоков литосферы. Позднее этот критерий рассматривался в совместной работе Манка и Макдональда [10] и автором настоящих строк [2]. Постановка задачи следующая.

Пусть внешняя жесткая несжимаемая оболочка Земли (литосфера), залегающая на полужидких текучих массах (астеносфере), разделена на множество блоков (геоблоки) и под влиянием тектонических сил коробится таким образом, что каждый блок движется вверх или вниз как целое независимо от соседних блоков. Кроме того, допускается, что хотя и общая величина погружающихся масс в блоках равна общей величине поднимающихся масс, тензор инерции флюктуирует, поскольку средние значения широты и долготы поднимающихся блоков не должны, вообще говоря, быть равными средним значениям широты и долготы опускающихся блоков (в статистическом представлении). Подобные перемещения геоблоков безусловно влияют на состояние как регулярности, так и симметричности вращения планеты; в частности, под влиянием таких перемещений масс меняется угловая скорость вращения (ω), момент инерции (J), расстояние между полюсом инерции и полюсом вращения Земли (α) [см. 1, 8, 10, 13, 15].

Для определения среднеквадратичных значений указанных величин Мунк и Ревель приводят следующие формулы:

для смещения полюса

$$\vec{m}_1 = 3\sqrt{\frac{3}{5}} \cdot P\frac{\rho_k}{\rho_e} \cdot \frac{\overline{Z}}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}, \tag{1}$$

для вариации вращения

$$m_3 = \frac{\Delta\bar{\omega}}{\omega} = \frac{\Delta J}{J} = \frac{6}{\sqrt{5}} \cdot \frac{\rho_k}{\rho_e} \cdot \frac{\overline{Z}}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}, \tag{2}$$

где ρ_k — средняя плотность геоблоков, ρ_e — средняя плотность Земли, $\overline{Z}$ — среднеквадратичное значение вертикального смещения геоблоков, n — число геоблоков ($n \gg 1$), R — средний радиус Земли, $P = 2\pi/\Omega$ — период свободной нутации оси Земли, $\overline{m}_1$ — угловая мера смещения полярной оси инерции от мгновенной оси вращения Земли, ΔJ, $\Delta\omega$ — вариации J и $\omega = 2\pi/T$ (для Земли без гидросферы принимается $P = 404$ сутки, среднее значение P для реальной Земли принимается равным 434 сутки = 1,19 лет, максимальное пиковое значение 457 суток) [см. 10, 14, 15].

Соотношения (1), (2) получены указанными авторами из условий:

$$\langle \Delta M \rangle^2 = \sum_i A_i^2 \langle Z_i^2 \rangle + \sum_{i \neq j}\sum A_i A_j \langle Z_i Z_j \rangle = 0, \tag{3}$$

$$\Delta M = \sum_i A_i Z_i = 0 \quad \text{(условие сохранения массы)}, \quad Z_i Z_j = r\overline{Z}^2, \tag{4}$$

$$B_i = (\rho_k a^2) A_i \cdot \sin^2\theta_i, \tag{5}$$

$$\langle \Delta J \rangle^2 = (\sum_i B_i^2 + r\sum_{i \neq j}\sum B_i B_j)\overline{Z}^2, \quad \Delta J = \sum_i B_i Z_i. \tag{6}$$

Здесь A — площадь поверхности геоблока, θ — коширота точки, для которой определяется радиальное смещение Z (относительно уровня моря), ρ_k — средняя плотность геоблока, $\langle \ \rangle$ — знак среднего значения данной величины (суммирование произведено от $i = 1$ до $i = n$). Полагая

$$\sum_i A_i^2 = nA^2, \quad \sum_{i \neq j}\sum A_i A_j = n(n-1)A^2, \quad r(1-n) = 1 \tag{7}$$

и исключая r из выражений (3), (4) для $\langle \Delta M \rangle$ и выражения (6) для $\langle \Delta J \rangle^2$, они получили:

$$B_i^2 (\rho_k a^2)^2 A^2 \sum_i \sin^4 \theta_i = (\rho_k a^2)^2 A^2 n \left(\frac{8}{15}\right), \tag{8}$$

$$\sum_{i \neq j}\sum B_i B_j = (\rho_k a^2)^2 A^2 n (n-1) \left(\frac{2}{3}\right)^2. \tag{9}$$

Учитывая, что $m_3 = \Delta J/J$, $J = kMa^2$ (k — безразмерный момент инерции, M — масса, ka^2 — квадрат радиуса инерции Земли) и подставляя в выражение (6) для $\langle \Delta J \rangle^2$ значения B_i, B_j из (8)—(9), можно прийти к формулам (1), (2).

В основе выражений (1), (2) лежит условие постоянства углового момента Земли $L_1 = J\omega = MS^2\omega = const$, дающее после варьирования

$$\frac{\Delta J}{J} = -\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta T}{T}; \quad \frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{2\Delta S}{S}. \tag{10}$$

Здесь M — масса, а S — радиус инерции (радиус жирации) Земли, равный $S = a\sqrt{k}$, $T = 2\pi/\omega$ — продолжительность суток (a — реальный радиус, k — безразмерный момент инерции Земли, равный в настоящее время 0,33089).

Сравнение выражений (1), (2) дает

$$\frac{m_1}{m_3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \approx P. \tag{11}$$

Мерой турбулентности геоблоков Мунк и Макдональд [10] считают период свободной нутации P мгновенной оси вращения планеты: чем больше P, тем хаотичнее движение геоблоков, и наоборот, чем меньше P, тем выше осевая симметрия процессов, вызывающих колебания полюсов. В своих расчетах они приняли в (1), (2) $\rho_e/\rho_k \simeq 2$, $n = 21$ (блоки размерами порядка Северной Америки) и для радиального смещения на $Z = 5$ *см* за 100 лет должны были получить $m_1 = 6 \cdot 10^{-7}$ *рад* и $m_3 = 2{,}30 \cdot 10^{-9}$ (при $Z = 5$ *см*/100 лет и $n = 12$ получается $m_1 = 7{,}75 \cdot 10^{-7}$ *рад* и $m_3 = 3{,}84 \cdot 10^{-9}$). По этим данным отношение $m_1/m_3 \approx 260$ и, следовательно, вероятность турбулентного движения геоблоков оказывается весьма высокой [см. 2, 10, 18]. Мунк и Макдональд полагают для XX века $m_1 = 5 \cdot 10^{-7}$, $m_3 = 5 \cdot 10^{-8}$, $m_1/m_3 < 10$ и делают вывод о высокой симметрии процессов, вызывающих покачивание полюсов и, следовательно, об отсутствии четко выраженной хаотичности в движении геоблоков, соответствующем условию $m_1/m_3 \gg 10$ [см. 10, стр. 298]. Близкое знакомство с работой Мунка и Макдональда показывает, что вопрос правомерности использованных ими формул (1), (2), (11), включающих период свободной нутации (прецессии) $P = 2\pi/\Omega$ нуждается в дополнительном обосновании, поскольку за число суток в таком периоде они взяли отношение $1/f \approx C/(C-A)$, справедливое для модели абсолютно твердой Земли (здесь С и А—полярный и экваториальный моменты инерции Земли). В действительности необходимо иметь в виду следующее.

В теории прецессии Эйлера частота собственных прецессионных колебаний (свободных нутационных колебаний). Земли определяется в системе осей инерции А, С из квадратного уравнения

$$(\Omega - f\omega)(\Omega + \omega) = 0. \tag{12}$$

Один из корней этого уравнения $\Omega_1 = f\omega$ определяет период свободной ретроградной нутации Эйлера для абсолютно твер ой модели Земли $2\pi/\Omega = 2\pi/f\omega = 305{,}5$ суток, а другой корень $\Omega_2 = -\omega = -2\pi/P$ характеризует период свободной нутации $P \simeq 1$ сутки. Это период т. н. квазисуточной или резонансной нутации, детально рассмотренной в трудах А. Пуанкаре (1910), Г. Ламба (1947), М. С. Молоденского (1961).

Согласно данным этих исследователей корень $\Omega_1 = f\omega = 2\pi/434$ указывает на то, что ядро Земли в отношении мантии имеет начальное произвольное смещение (которое продолжает сохраняться и дальше), но относительно главных осей инерции А и С не смещается. Второй корень $\Omega_2 = -\omega$, наоборот, указывает на смещенность мантии как в отношении ядра, так и в отношении осей инерции. В этом случае ось инерции мантии свободно покачивается вокруг мгновенной оси вращения Земли с периодом 1 сутки, находясь в резонансе с суточными твердыми приливами Земли [11].

При пользовании формулами (1), (10) необходимо предварительно уточнить какое значение P или какой корень Ω должен приниматься во внимание: $P = 305$ суток (период Эйлера), $P = 434$ суток (период Чандлера) или $P \cong 1$ сутки (период Пуанкаре). Период Чандлера согласно формуле (11) приводит к результату $m/m_3 = 374$ и указывает на сильную турбулентность геоблоков, а период Пуанкаре дает $m_1/m_3 = 0{,}866 \approx 1$ и, как уже отмечалось, свидетельствует о высокой осевой симметрии процессов, обуславливающих колебания полюса. Данные Международной службы широты (ILS), Международной службы времени и Международной службы движения полюсов (IPMS) указывают на наличие отчетливо проявленной свободной прецессии оси вращения Земли с периодом 434 сутки, причем устанавливаются периодические колебания расстояния между полюсом инерции и полюсом вращения в пределах от 0,05″ до 0,15″ (при стандартном отклонении 0,007″—по наблюдениям за 1461 день) и цикле колебания $\tau = 13{,}3 \pm 1{,}4$ лет $= 4{,}197 \cdot 10^8 \pm 0{,}44 \cdot 10^8$ *сек*. Среднеквадратичное значение амплитуды колебания полюса за время $\tau = 13$ *лет* принимается равным $\Delta\alpha = 0{,}14'' = 7{,}06 \cdot 10^{-7}$ *рад* $= 4{,}5$ *м*, а скорость нутации $\Delta\alpha/\Delta t = 7{,}06 \cdot 10^{-7}$ *рад*$/4{,}197 \cdot 10^8$ *сек* $= 1{,}68 \cdot 10^{-15}$ *рад/сек* $= 5{,}31 \cdot 10^{-8}$ *рад/год* $= 33{,}8$ *см/год* или примерно 1 *м* за 3 года. Этот результат ($\Delta\alpha = 0{,}14''$) недавно был подтвержден по данным наблюдений в течение 61 дня за широтой 2931 звездной пары [15]. В недавней работе Н. С. Сидоренко [14] для последних 90 *лет* получено $\Delta\alpha = 0{,}16'' = 8{,}07 \cdot 10^{-7}$ *рад* $= 5{,}1$ *м*, $\tau = 13 \pm 1$ *лет*, $P = 1{,}19$

лет. Вариация вращения $\Delta\omega/\omega$ была определена в работе автора (Асланян, 1977) на основе чандлеровской теории нутации из условия уменьшения радиуса инерции Земли для абсолютно твердой модели последней ($P=305{,}5$ суток, $f=1/305{,}5$). Поскольку гироскопический момент, соответствующий чандлеровскому колебанию полюса вращения $\Delta\alpha$, равняется

$$\Delta N_e = -Jf\omega^2\Delta\alpha, \tag{13}$$

а при изменении радиуса инерции S вращательный момент Земли меняется на величину

$$\Delta N_r = -J\omega^2\cdot\frac{\Delta\omega}{\omega} = -J\omega^2\frac{2\Delta S}{S}, \tag{14}$$

то, полагая $\Delta N_e = \Delta N_r$, получаем

$$\frac{2\Delta S}{S} = -\frac{\Delta\omega}{\omega} = f\Delta\alpha. \tag{15}$$

Изменение расстояния между полюсом инерции и полюсом вращения на угол $\Delta\alpha$ (амплитуда колебания) происходит, как уже указывалось, за время $\tau\approx 13$ лет (предельные оценки по астрономическим данным 11,83—13,28 лет).

Записывая пропорцию

$$\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = f\frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \tag{16}$$

и подставляя $f=1/305{,}51$, $\Delta\alpha=7{,}06\cdot10^{-7}$ *рад*, $\tau=13$ *лет*, получим

$$\Delta\omega/\omega\tau = \dot\omega/\omega = 17{,}78\cdot10^{-9}\ \textit{век}^{-1}.$$

Эта оценка вариации вращения Земли удовлетворительно согласуется с последними данными о вековом замедлении орбитального движения Луны ($dn/dt = -42\pm6''$ *век*$^{-2}$), с данными о наиболее продолжительных затмениях Солнца ($dn/dt = -41{,}8\pm4{,}3''$ *век*$^{-2}$), наблюдавшихся за 500 лет до нашей эры, а также с палеонтологическими данными, указывающими на увеличение продолжительности суток за последние 370 *млн.* лет на 23 *сек* за каждый 1 *млн. лет* [см. 1, 3, 4, 20, 22]. Кроме того, она согласуется с данными анализа котидальных карт, указывающих на величину момента приливных сил Луны $7{,}29\cdot10^{23}$ *эрг* и Солнца $0{,}98\cdot10^{23}$ *эрг*, дающих максимально возможное значение приливного торможения Земли $(\dot\omega/\omega)_t = 44{,}5\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ против фактически наблюдаемого значения $(\dot\omega/\omega)_f \simeq 27{,}5\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ [18]. Эти данные практически не отличаются от данных Р. Ньютона для древнего мира (за 500 *лет* до нашей эры) $\dot n = -41{,}6''\pm4{,}3''$ *век*$^{-2}$, $\dot\omega/\omega = -27{,}7\pm3{,}4$ *век*$^{-1}$ и для нового времени (после 1000 г.) $\dot n = -42{,}3''\pm6{,}1''$ *век*$^{-2}$ и $\dot\omega/\omega = -22{,}5\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ [20]. Максимально возможное значение уменьшения радиуса Земли, соответствующее значению $\dot\omega/\omega = 17{,}78\times10^{-9}$ *век*$^{-1}$, получается из пропорции (15) при условии, что

$$2\Delta S/S = 2\Delta R/R = \Delta\omega/\omega = f\Delta\alpha. \tag{17}$$

За один цикл продолжительностью 13 *лет* при $f=1/305{,}5$ получаем $\Delta R_{\max}=\frac{1}{2}Rf\Delta\alpha=0{,}736$ или 5,67 *см* за 100 *лет*. Можно показать, что минимальное значение ΔR будет 4,64 *см* за 100 *лет*, если начальное значение безразмерного момента инерции Земли принять $k_i=0{,}4$, а современное значение $k=0{,}331$ [3, 4].

Как уже указывалось, максимальное значение углового расстояния между полюсом вращения и полюсом инерции в среднем составляет 0,3″. Амплитуду колебания этого расстояния, связанную с чандлеровским фактором, можно принять равной половине этого угла, т. е. $\Delta\alpha=0{,}15''=7{,}75\cdot10^{-7}$ *рад*, отношение $\Delta\alpha/\tau=1{,}85\cdot10^{-18}$ *рад/сек* $=5{,}83\cdot10^{-8}$ *рад/год*, $\Delta\omega/\omega\Delta t=f\Delta\alpha/\tau=19{,}11\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$.
Из пропорции

$$\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta\tau}=\frac{2\Delta S}{S\tau}=\frac{f\Delta\alpha}{\tau} \tag{18}$$

можно определить темп уменьшения радиуса инерции Земли $S=R\sqrt{k}$ для указанных выше трех оценок $\Delta\omega/\omega\tau$: $17{,}78\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$, $19{,}11\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ и $20\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$. Современное значение $S=6371\sqrt{0{,}33089}$ *км* $=6371$ *км* $\times\,0{,}575=3664$ *км*. При этих значениях S и k получаем соответственно $\Delta S=3{,}26$ *см/век*, $\Delta S=3{,}50$ *см/век*, $\Delta S=3{,}68$ *см/век*. В случае, если объем Земли остается постоянным, изменения S и связанные с ними изменения скорости вращения относятся всецело за счет внутреннего перераспределения масс, что для уменьшения S будет связано с увеличением центральной конденсации планеты (если вся масса звезды сосредотачивается в ее центре, то $k_f=2/15$, для случая массовой однородности $k_i=2/5$, для Солнца, Юпитера, Сатурна с большой точностью можно принять $k=0{,}245$). Очевидно, если имеется внутренний ускоряющий механизм, препятствующий приливному торможению, следует говорить в общем случае об одновременном уменьшении как R, так и k. Вклад центральной конденсации можно оценить по дроби $(k_i-k)/\tau_0=\Delta k/\tau$, полагая $k_i=2/5$; $k=0{,}33089$ и $\tau_0=4{,}6\cdot10^9$ *лет* (возраст Земли). При этих данных получаем $\Delta k/\tau_0=1{,}5\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ и при $R=const.$ из условия $k\omega=const.$
получаем

$$\frac{\Delta k}{k\tau}=\frac{\Delta\omega}{\omega\tau} \tag{19}$$

и приходим к выводу, что при внутренней перестройке Земли из состояния однородного шара с $k_i=0{,}4$ к современному состоянию с $k=0{,}331$ (значительная концентрация масс в ядре) относительное увеличение скорости вращения по этой причине составит всего $4{,}53\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$ против наблюдаемого значения $19{,}11\cdot10^{-9}$ *век*$^{-1}$. Если согласиться с мнением о том, что современная слоистая мегаструктура Земли формировалась еще в догеологическое время (по оценке Ф. Берча и Г. Рингвуда, металлическое ядро Земли образовалось на ранней стадии ее эволюции, вероятно в течение всего $10^4 - 10^6$ *лет*), то фактору Δk придется отвести совершенно ничтожную роль ($k \simeq const.$) и тогда основную роль в ускорении вращения Земли по внутренним причинам должно играть уменьшение радиуса. При $k \simeq const.$ из условия $k\omega R^2 = const.$ получаем

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{2\Delta R}{R}; \quad \frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = -\frac{2\Delta R}{R\Delta t} = \frac{f\Delta\alpha}{\Delta t}. \tag{20}$$

Отсюда получаем при $f = 1/305{,}51$, $\Delta\alpha = 0{,}14''$ и $\Delta\alpha = 0{,}15''$, $\Delta\alpha/\Delta t = 5{,}31 \cdot 10^{-8}$ *рад/год* и $\Delta\alpha/\Delta t = 5{,}23 \cdot 10^{-8}$ *рад/года* $(\Delta R)_{max} = 6{,}37$ *см/век* $\div$ $\div$ $6{,}94$ *см/век*. Если исключить из оценки $\Delta\omega/\omega\Delta t = 19{,}11 \cdot 10^{-9}$ *век*$^{-1}$ вклад от внутренней перестройки планеты $\Delta k/k\Delta t = 4{,}53 \cdot 10^{-9}$ *век*$^{-1}$, т. е. принять

$$\frac{2\Delta R}{R\Delta t} = \frac{f\Delta\alpha}{\Delta t} - \frac{\Delta k}{k\Delta t}, \tag{21}$$

то получим $\Delta R = 4{,}64$ *см/век*. Эта оценка близка к результатам, полученным в работах [7, 13].

Обращаясь к оценке скорости уменьшения радиуса реальной Земли, для которой $P = 434$ сутки и $f = f' = 1/434$, $f'\Delta\alpha = 1{,}63 \cdot 10^{-9}$ *рад*, т. е. учитывая, что для последней P на 40% больше (f' на 40% меньше f), чем для абсолютно твердой модели, следует результаты расчетов по формулам (8)—(14) уменьшить в части оценки ΔR в 3/5 раза. В частности для случая гомологического сжатия ($k = const.$, $dk/dt = 0$) для цикла $\tau = 13$ *лет*, получим $\Delta R = \frac{1}{2} Rf\Delta\alpha = 5{,}18$ *см* или $\Delta R = 3{,}99$ за 100 *лет*; для негомологического сжатия, учитывающего равномерное уменьшение k от начального значения 0,331 за время $4{,}6 \cdot 10^9$ *лет* (соответственно при $2\Delta\sqrt{k}/\sqrt{k} = 0{,}19894$ или $2\Delta\sqrt{k}/\sqrt{k} = 4{,}4 \cdot 10^{-9}$ за 100 *лет*) согласно формуле

$$\frac{2\Delta R}{R} = f'\Delta\alpha - \frac{2(\Delta\sqrt{k})}{\sqrt{k}} \tag{22}$$

получим

$$\Delta R = \frac{1}{2} Rf'\Delta\alpha - \frac{1}{2} R\left(\frac{2(\Delta\sqrt{k})}{\sqrt{k}}\right) = 2{,}59 \text{ см за } 100 \text{ лет}.$$

Таким образом, для двух основных моделей реальной деформируемой Земли получаем $\Delta R = 3{,}99$ *см* за 100 *лет* (металлическое ядро обособилось в этой модели в основном в катархее) и $\Delta R = 2{,}59$ *см* за 100 *лет* (образование ядра и гравитационная дифференциация вещества вообще происходили в этой модели более или менее равномерно в течение всего геологического времени). Последние оценки мало отличаются от результатов, указываемых в работе [5].

В литературе неоднократно отмечалось, что контракция Земли является процессом хотя и перманентным, но прерывистым—процесс уменьшения объема временами может прекращаться или даже уступать место эпизодическому процессу увеличения объема. Непрерывное сжатие с термодинамической точки зрения может иметь место при изотермичности процесса, т. е. при комплементарности процесса отвода тепла. При невозможности теплосъема происходит остановка процесса сжатия или в крайнем случае адиабатическое расширение планеты [3]. По оценке Макдональда, разумной мерой расширения можно считать временное увеличение радиуса порядка 10 *км* [10]. Магматическая активность (массоперенос) и конвективные течения, являющиеся высокоэффективным способом теплоотвода, отражают тенденцию Земли предотвращать недра от перегрева. Пульсационная теория тектонической эволюции Земли основана по существу на указанном механизме контракции, прерываемой кратковременными актами остановки или изредка расширения планеты. В эту схему полностью вписывается механизм конвекции, который с одной стороны использует для движения глубинных масс энергию гравитационного сжатия Земли, а с другой стороны обеспечивает эффективный отвод тепла из недр. По оценке С. Кларка [6], этот процесс приобретает решающую роль, если скорость уменьшения радиуса $v_r > 10^{-9}$ *см/сек* (более 3 *см* за 100 *лет*). Согласно палеонтологическим данным, строматолиты формации *Biwabick-Gunflint*, имеющие возраст $1{,}9 \pm 0{,}2 \cdot 10^9$ *лет*, развивались в условиях, когда Земля делала полный оборот вокруг Солнца не менее чем за 448 суток, синодический месяц имел длительность 32 сутки, а в сутках было 19 современных часов [см. 16]. Эти данные дают увеличение продолжительности суток на 1 *сек* за 100.000 *лет* ($\Delta\omega/\Delta t = 11 \cdot 10^{-9}$ *век*$^{-1}$) против наблюденных в современную эпоху 2,3 *сек* за 100.000 *лет*. Для фанерозойского времени, согласно палеонтологическим данным, основанным на анализе годичных и месячных структур роста кораллов, морских двустворчатых, увеличение продолжительности суток составляет 22 ± 1 *сек* за 10^6 *лет* [см 21, 23].

Рассматривая проблему квазисуточной нутации Земли, в работе [1] автор показал ее связь с главным дипольным магнитным полем планеты. Оказалось, что соответствующий квазисуточной нутации гироскопический вращательный момент компенсируется противоположно направленным магнитным прецессионно-вращательным моментом и соответственно, если полная энергия нутации Земли равняется

$$E = \frac{1}{2} kMR^2\omega^2 \frac{\Omega}{\omega} \sin^2\alpha = E_k \cdot \frac{\Omega}{\omega} \sin^2\alpha, \qquad (23)$$

а энергия магнитного поля

$$U = \frac{H^2}{8\pi} \cdot \frac{M}{\rho}, \qquad (24)$$

то для квазисуточной нутации, когда $\omega = -\Omega = 2\pi/T$ ($T \approx 24$ *ч*) при $E = -U$, $\omega R = v$, получаем напряженность магнитного поля Земли (в гауссах)

$$H = v \sin\alpha \sqrt{4\pi k\rho} = 0{,}315 \text{ гс}.$$

Можно также отметить, что E в (23), равная $10^{24{,}71}$ *эрг*, равняется энергии землетрясения с предельно высокой магнитудой $M = 8{,}61$ (согласно формуле Гутенберга-Рихтера $\lg E = 11{,}8 + 1{,}5\ M$).

В заключение следует отметить, что проблема турбулентности литосферных блоков имеет близкое сходство с проблемой конвективных течений в мантии Земли, особенно если иметь в виду конвекцию с сетью симметрично расположенных ячеек (например, поднятие в пределах шести и опускание также в пределах шести ячеек с латеральным сечением каждой ячейки максимум $R \times R = 40000$ *км*^{2}). Поэтому, полученное выше решение о большой вероятности развития турбулентных движений литосферных блоков является по существу также решением о большой вероятности развития в мантии конвективных течений, которые как и турбулентные движения в указанном выше представлении при надлежащем выборе модели литосферной мозаики могут быть истолкованы под углом зрения теории гравитационного сжатия Земли [3, 4].

Иститут геологических наук
АН Армянской ССР

Поступила 11. X. 1983.

Ա. Տ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

ԼԻԹՈՍՖԵՐԱՅԻՆ ՍԱԼԵՐԻ ՏՈՒՐԲՈՒԼԵՆՏՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓԱՆԻՇԻ ՍԱՀՄԱՆՄԱՆ ՇՈՒՐՋ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Եթե լիթոսֆերան դիտարկենք իբրև հոսուն հիմքի վրա տեղադրված մի անսեղմելի թաղանթ և ընդունենք, որ այն ենթարկվում է ծռման ու բեկորատման երկրի գրավիտացիոն սեղմման հետևանքով և այդ ընթացքում տրոհվում է n *թվով նույնատիպ բեկորների (սալերի, գեոբլոկների), ապա տուրբուլենտության պարզունակ ոճականացված մոդել կարելի է համարել այդ սալերի բազմության մի կեսի* (n/2) *բարձրացումը (մեկընդմեջ դասավորությամբ) և բազմության մյուս կեսի* (n/2) *իջեցումը։ Այսպիսի պատկերը նման է* n *բջիջներից բաղկացած Երկրի պատյանում կոնվեկցիայի պարզեցված սխեմային։ Այնուհետև, եթե լիթոսֆերայի դիտարկվող կոնտրակցիոն մեխանիզմը հանդիսանում է բևեռների չանդլերյան տատանումների պատճառ (լարումների աճի և ռելաքսացիայի հերթափոխություն* $\tau \approx 13$ *տարվա մարման ժամանակամիջոցով ինչպես և Երկրի պտույտի արագության ոչմակընթացային բաղադրամասի պատճառ* (m_3), *ապա տուրբուլենտության* $m_1/m_3 = \sqrt{3}\,P/2 \approx P$ *չափանիշի քանակական գնահատման համար անհրաժեշտ պարամետրերը կարող են որոշվել բևեռի շեղման միջին քառակուսային արժեքի՝* $m_1 \approx \Delta\alpha = 7{,}06 \times 10^{-7}$ *ռադ և* $m_3 = f\Delta\alpha \approx 2{,}31 \cdot 10^{-9}$ *13 տարում արժեքների հիման վրա (*f*-ը Երկրի դինամիկ սեղմումն է, որը հավասար է 1/305,51 և Երկրի առանցքի ազատ նուտացիայի պարբերության մեջ օրերի թվի արժեքի՝* $P = 2\pi/\Omega$ *հիման վրա, որը ստացվում է* $(\Omega - fw)(\Omega + w) = 0$ *քառակուսի հավասարումից։*

Վ. Մունկի և Ռ. Ռևելի (1952) կողմից առաջարկված չափանիշի համաձայն P-ի մեծ արժեքները բնութագրում են գեոբլոկների շարժման տուրբուլենտությունը (քաոսայնությունը), իսկ համեմատաբար փոքր արժեքներն, ընդհակառակը, վկայում են զգալի տուրբուլենտության բացակայության մասին։ Այս հավասարման փոքր արմատի համար $P=P_1=-2\pi/\Omega_1=-2\pi/\omega$ ($\omega=2\pi/T$ — Երկրի օրապտույտի անկյունային արագությունն է, T-ն օրվա տևողությունը), $P_1=T\approx 24$ ժամ (քվազիօրական կամ ռեզոնանսային նուտացիա) և $m_1/m_3\approx 1$ ($P_1=1$ օր պարբերության հետ կապված պտտական մոմենտն այստեղ չեզոքացված է հակառակ ուղղված երկրամագնիսական պրեցեսիոն մոմենտով)։ Հավասարման երկրորդ՝ մեծ արմատի համար $P=P_2=2\pi/\Omega_2$, $\Omega_2=f\omega$, $P=P_2=2\pi/f\omega=305{,}5$ օր) էյլերյան նուտացիայի պարբերությունը Երկրի բացարձակ կարծր մոդելի համար։ Իրական Երկրի համար $P=434$ օր (չանդլերյան նուտացիայի պարբերությունը), իսկ $m_1/m_3\approx 434$, հետևաբար լիթոսֆերային բլոկներն այս դեպքում գտնվում են տուրբուլենտության վիճակում։ Այս նույն տեսանկյունից կարող են քննարկվել Երկրի պատյանում շարժվող այն կոնվեկտիվ հոսանքները, որոնք սնվում են Երկրի գրավիտացիոն սեղմման ջերմային էներգիայով (ֆազային անցումներ և այլն)։

Ըստ $2\Delta R/R=m_1/P$ առնչության, երբ $P=434$, $R=6371$ կմ, $m_1=7{,}06\cdot 10^{-7}$ ռադ, $\tau=13$ տարի, Երկրի շառավիղը ժամանակակից էպոխայում կրճատվում է $\Delta R=4$ սմ 100 տարվա ընթացքում։ ΔR-ի այս արժեքին ֆաներոզոյի ընթացքում (570 մլն տարի) համապատասխանում է լիթոսֆերայի մեծ շրջանների կրճատում 1500 կմ չափով (ծռումների, ճմլումների, սուբդուկցիայի և այլն հետևանքով)։

A. T. ASLANIAN

ON DETERMINING THE CRITERION OF LITHOSPHERE PLATES TURBULENCE

Abstract

A view of lithospere as a fluent-bed-supported incompressible shell being warped and destructed by the Earth's gravitational compression into n identical blocks (plates, geoblocks) gives the simplest stylized model of turbulence with half the set (n/2) of plates being uplifted and the other half (n/2) submerged alternately. This presentation is similar to a simplified convection scheme within the mantle consisting of n cells.

Further, if the contraction mechanism of lithosphere warping under consideration is at the bottom of the Chandler's pole wobbling (alternate increasing and relaxation of stresses with a characteristic damping period $\tau=13$ years) and the variation of the non-tidal component of the Earth's rotational velocity m_3, then the parameters needed for the quantitative evaluation of turbulence criterion $m_1/m_3=\sqrt{3}P/2\approx P$ will be determined on the basis of the known value of the pole displacement

mean square root quantity $m_1 \approx \Delta\alpha = 7,06 \cdot 10^{-7}$ *rad*, $m_3 = f\Delta\alpha = 2,3 \times \times 10^{-9}$ during 13 years (f is dynamic compression of the Earth being equal to 1/305,51) and the value of number of days in the period of free nutation $P = 2\pi/\Omega$ as determined from the quadratic equation $(\Omega - - f\omega)\cdot(\Omega + \omega) = 0$.

According to the criterion introduced by W. Munk and R. Revelle (1952), relatively great values of P charecterize the turbulence (chaotic state) of geoblocks movements while relativele small ones on the contrary indicate the absence of any appreciable turbulence.

For the minor root $P = P_1 = -2\pi/\Omega_1 = 2\pi/\omega$ ($\omega = 2\pi/T$ is the angular velocity of the Earth's daily motion; T is duration of a day), $P_1 = = T \approx 24$ *h* (quasi-daily or resonance nutation) and $m_1/m_3 \approx 1$ (rotatory-gyroscopic momentum related to the period of $P = 1$ day is compensated by the contrary-directed magnetic precessional momentum of the Eartn); for the second major root $P = P_2 = 2\pi/\Omega_2$, $\Omega_2 = f\omega$, $P = P_2 = 2\pi/f\omega = = 305.5$ days (the period of Euler's nutation for a absolutely solid Earth); for the real Earth $P = 434$ days (the period of Chandler's nutation), $m_1/m_3 \approx 434$ and thus, lithosphere blocks in this case are in the state of turbulence.

A similar aspect may be used for considering the convective flows in the mantle maintained mainly by thermal energy of gravitational compression (phase transitions e. t. c.) of the Earth. According to $2\Delta R/R = \Delta\alpha/P$ when $P = 434$, $R = 6371$ *km*, $\Delta\alpha = 7,06 \cdot 10^{-7}$ *rad*, $\tau = 13$ years, the Earth's radius reduction for the contemporaneous epoch makes 4 *cm* in 100 years. The ΔR value indicates the reduction of large lithosphere circles for Phanerozoic era by 1500 *km* (resulting from bendings, subduction, crumpling e. t. c.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Асланян А. Т.* Квазисуточная нутация и магнитное поле Земли. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. 31, № 4, 1978.
2. *Асланян А. Т.* Архейские водоросли, лунные приливы и гравитационная постоянная. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. 32, № 6, 1979.
3. *Асланян А. Т.* Конвекция и контракция. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. 35, № 6, 1982.
4. *Асланян А. Т.* Большие изменения внутреннего объема и полярного сжатия Земли и их тектонические последствия. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. 36, № 3, 1983.
5. *Васильковский Н. П., Каттерфельд Г. Н., Лапо М. С.* Гравитационное сжатие Земли и тектогенез. Известия АН Арм.ССР, Науки о Земле, т. 35, № 2, 1982.
6. *Кларк С. П.* Теплопроводность в мантии. В сб. «Земная кора и верхняя мантия». Мир, М., 1972.
7. *Кузнецов М. В.* Расчет векового замедления вращения Земли по современным котидальным картам. Физика Земли, № 12, 1972.
8. *Куликов К. А.* Изменяемость широт и долгот. М., 1962.
9. *Ламб Г.* Гидродинамика. М., 1947.
10. *Минк У., Микдональд Г.* Вращение Земли. М., 1964 (1960).
11. *Мельхиор П.* Физика и динамика планет. Том II, Мир, М., 1976.
12. *Молоденский М. С.* Теория нутации и суточных земных приливов. Сб. «Земные приливы и нутация». Изд. АН СССР, М., 1961.
13. *Парийский Н. Н.* Неравномерность вращения Земли. Тр. ИФЗ АН СССР, № 26 (153), 1955.

14. *Сидоренко Н. С.* Неравномерность вращения Земли и движение полюсов. Природа, № 4, 1982.
15. *Grabar M. A.* Analysis of star pair latitudes. Journ. Geophys. Res., vol. 24, № 1310, 1979.
16. *Jeffreys H.* Nutation, Mon. Not. Roy. Astr. Sec., 119. 2, 1959.
17. *Lamar D. L., Merifield P. M.* Influence of solar tidal torque on length of day and synodic month. Journ. Geophys. Res., vol. 72, № 14, 1967.
18. *Morrison L. V.* Rotation of the Earth from AD 1663–1972 and the constancy of G. Nature, vol. 241, Febr. 23, 1973.
19. *Munk W., Revelle R.* On the geophysical interpretation of irregularities in the rotation of the Earth. Mon Not. Roy. Astr. Soc., Geophys. suppl., 6, 1952.
20. *Neuton R. R.* Ancient astronomical observations and accelerations of the Earth and Moon. John Hopkins Press, London, 1970.
21. *Piper J. D.* Geological and geophysical evidence relating to continental growth on dynamics and the hydrosphere in precambrian times: a review and analysis. Tidal friction and the Earth's rotation, Springer—Verlag, Berlin, 1978.
22. *Poincaré H.* Sur la precession des corps deformables. Bull. Astron., 27, 1910.
23. *Scrutton C. T.* Periodic growth features in fossil organisms and the length of the day and month. Tidal friction and the Earth's rotation, Springer-Verlag, Berlin, 1978.