

ГЕОФИЗИКА

В.Н. Боков, Е.Ш. Гутшабаш, Л.З. Потиха

АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ТРИГГЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

V.N. Bokov, E.Sh. Gutshabash, L.Z. Potiha

ATMOSPHERIC PROCESSES AS TRIGGER EFFECT OF EARTHQUAKES OCCURRENCE

Представлены результаты исследований по влиянию изменения атмосферного давления на возникновение дополнительных напряжений в зоне разлома геоблоков и тектонических плит. Показано, что величина дополнительных напряжений не является большой. Однако характерной особенностью дополнительных напряжений, вызванных атмосферными процессами, является их импульсный характер по сравнению с тектоническими процессами (характерные времена отличаются на 3-4 порядка). Это приводит к активизации релаксационных процессов и способствует разрядке локальных избыточных напряжений.

Ключевые слова: изменения атмосферного давления, дополнительные напряжения, тектонические процессы.

Results of researches on influence of atmospheric pressure changes on occurrence of additional pressure in a zone of a geoblocks break and tectonic plates are presented. It is shown that the size of additional pressure isn't big. However prominent feature of the additional pressure caused by atmospheric processes is: their pulse character in comparison with tectonic processes (characteristic times differ on 3-4 order). It leads to activation of relaxation processes and promotes a discharge of local superfluous pressure.

Key words: of atmospheric pressure changes, the additional pressure, the tectonic processes.

1. Введение

Традиционно принято считать, что землетрясения возникают за счет тектонических напряжений, которые обусловлены дрейфом тектонических плит, а также физико-химическими процессами, происходящими внутри Земли. Исследования последних лет показали, что в разломах земной коры возникают добавочные напряжения под воздействием экзогенных процессов – приливных явлений, атмосферных возмущений, изменчивости гидрологического режима [2–7, 12, 15].

В ряде работ [2, 3, 15] отмечается, что изменчивость атмосферной циркуляции является триггером по отношению к сейсмичности. На основании анализа исторических данных показано [4], что межгодовая изменчивость сейсмично-

сти Земли связана с межгодовой изменчивостью атмосферной циркуляции. Также выявлено, что внутригодовая сейсмическая активность коррелирует с изменчивостью атмосферной циркуляции (сезонные смещения климатических фронтов относительно тектонических разломов) [5, 6]. При этом существенными оказываются не только общие закономерности циркуляционных процессов, но и региональные особенности, специфические для различных сейсмоопасных регионов.

В качестве объяснения указанных результатов предлагается следующий возможный механизм. Быстрые смещения крупных воздушных масс увеличивают или снимают нагрузки на земную кору и приводят к ее деформации. Образовавшиеся дополнительные деформации коры между геоблоками служат спусковым механизмом землетрясений, которые уже предварительно подготовлены эндогенными процессами.

Проведенные в последние годы наблюдения и расчеты показали, что в основном землетрясения происходят в области пониженных напряжений. К этим областям в первую очередь относятся разломы между плитами и геоблоками. Расчеты, выполненные для различных сейсмоактивных участков земной коры, показали [13], что сила сцепления блоков трещиноватых массивов горных пород не превышает 50–100 бар или $5\text{--}10^6$ Па. Существующие в земной коре максимальные касательные напряжения τ значительно изменяются по латерали и составляют от 0,5 до 1,5 кбар или $5\text{--}15^7$ Па [13].

В данной работе делается попытка оценить добавочные механические напряжения в твердой оболочке Земли, инициируемые атмосферными возмущениями, и предлагаются дополнительные соображения, касающиеся механизма влияния атмосферных процессов на сейсмические процессы.

2. Триггерный эффект

Попытаемся объяснить тот факт, что сильным землетрясениям предшествуют обширные пространственные вариации атмосферного давления, меняющие свой знак на областях земной поверхности, сравнимых с размерами в половину континента [2–3, 15].

Важно отметить, что не любые интенсивные атмосферные преобразования в синоптическом диапазоне пространственной (сотни-тысячи километров) и временной изменчивости (несколько суток) приводят к возникновению землетрясений. Обсуждаемый механизм инициирования землетрясений проявляется при выполнении двух условий: достаточной подготовленности области потенциального разрушения в твердой оболочке Земли (накопление локальных повреждений) и определенного распределения атмосферных давлений, способствующего высвобождению накопленной энергии.

Поскольку земной коре свойственна трещиноватость [10] и миграция флюидов [12], то в процессе подготовки землетрясений небольшое расшатывание блоков под влиянием различных причин приводит к образованию микротрещин вокруг скола, в которые поступают вода и литосферные газы. Поступ-

ление водной и газовой составляющих – флюидов, осуществляется под атмосферным давлением как сверху, так и под литостатическим давлением снизу разлома. Со временем, под влиянием медленно протекающих процессов, микротрещины переходят в крупные. Поэтому наблюдается значительно более низкий уровень напряжений, ответственный за возникновение землетрясений, чем считалось ранее [13]. Поровое давление флюидов по глубине выше значений, отвечающих гидростатическому закону, и местами приближается к литостатическому давлению [12, 13]. При этом геофизики и сейсмологи начинают наблюдать проявления предвестников, но землетрясения в этих случаях часто не происходят. Они могут произойти в условиях насыщения разлома флюидами и при возникновении атмосферного триггерного эффекта – появлении дополнительных напряжений, обеспечивающих «скольжение» одного или нескольких сколов (зацепов) разлома.

Схематично описывая антициклон, представим его барическим образованием с максимумом давления в центре с уменьшением атмосферного давления при приближении к границам. Противоположное пространственное распределение атмосферного давления имеет циклон. При прохождении антициклона создается избыточное давление на соответствующий участок земной поверхности (результатирующая избыточная нагрузка может достигать $5 \cdot 10^8$ кг/км²). Для циклона – области пониженного давления – наблюдается обратная картина. Таким образом, система циклон-антициклон порождает дополнительные напряжения/деформации в земной коре на границе циклона и антициклона. На рис. 1 схематически показаны: 1 – граница циклона (Zn) и антициклона (Az); 2 – силы, влияющие на прогиб плит; 3 – формы прогиба земной коры; 4 – касательные напряжения τ . Если линия атмосферного давления, разграничивающая антициклон и циклон, находится над разломом и проходит вдоль него, то возникают существенные различия в физических действиях с разных сторон разлома [3, 15].

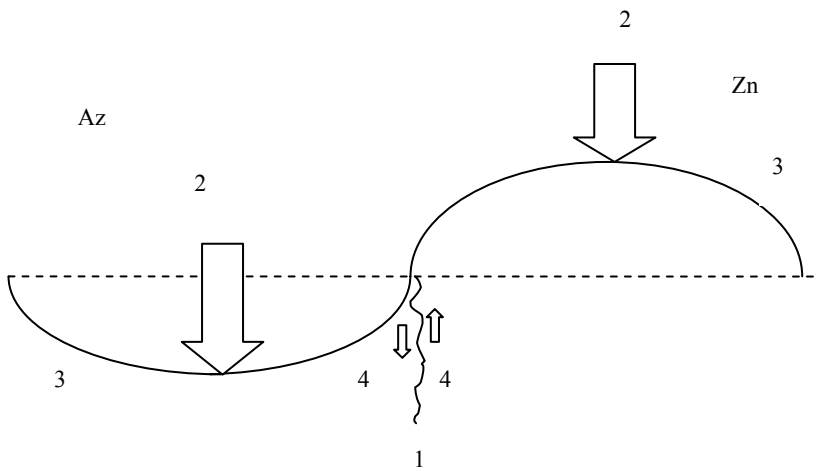


Рис. 1. Атмосферные воздействия на тектоническом разломе

3. Приближение плоской задачи теории упругости для полупространства

Как известно, горизонтальный размер антициклона или циклона составляет сотни и тысячи километров, а средняя глубина блоков и плит около 30–50 км на континенте и 7–25 км над океаном. Таким образом, учитывая то, что нас интересуют крупномасштабные изменения напряженного состояния, достаточно хорошим приближением можно считать приближение плоской задачи теории упругости [8].

Пренебрегая кривизной земной поверхности, рассмотрим полуплоскость

$$R_+^2 = \{-\infty < x < \infty, y > 0\}$$

и предположим, что ось y направлена вниз (вглубь Земли). Пусть, далее, к верхней границе такой области ($y = 0$) приложено сжимающее напряжение $f(x) < 0$; при этом $f(x) < -p_0$ в области антициклона и $f(x) > -p_0$ в области циклона, где p_0 – нормальное атмосферное давление на поверхности Земли. Тогда фактические значения атмосферного давления на ней будут даваться выражением

$$\varphi(x) = f(x) + p_0.$$

Будем исходить из статической системы уравнений плоской задачи теории упругости в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений, а в качестве граничных условий примем, что

$$\sigma_{y|y=0} = f(x), \quad \tau_{xy|y=0} = g(x), \quad -\infty < x < \infty, \tag{2}$$

где $f(x), g(x)$ – заданные функции, достаточно быстро убывающие при $|x| \rightarrow \infty$.

Решение приведенной граничной задачи хорошо известно и имеет вид [16, 17]:

$$\sigma_x(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [(1 - |\lambda|y)\hat{f}(\lambda) + (2\frac{|\lambda|}{\lambda} - \lambda y)i\hat{g}(\lambda)]e^{-|\lambda|y}e^{-i\lambda x}d\lambda = \tag{3}$$

$$= \frac{2y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi)(x - \xi)^2}{[(x - \xi)^2 + y^2]^2},$$

$$\tau_{xy}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [i\lambda y\hat{f}(\lambda) + (1 - |\lambda|y)\hat{g}(\lambda)]e^{-|\lambda|y}e^{-i\lambda x}d\lambda = \tag{4}$$

$$= \frac{2y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi)(x - \xi)}{[(x - \xi)^2 + y^2]^2}$$

$$\sigma_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [(1 + |\lambda|y)\hat{f}(\lambda) + i\lambda y\hat{g}(\lambda)]e^{-|\lambda|y}e^{-i\lambda x}d\lambda = \tag{5}$$

$$= \frac{2y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\xi)(x - \xi)}{[(x - \xi)^2 + y^2]^2},$$

$$\text{где } \hat{f}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{i\lambda x}dx, \quad \hat{g}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{i\lambda x}dx, \tag{6}$$

– Фурье-образы граничных условий $f(x)$ и $g(x)$ соответственно.

Поля смещений $\sigma_y(x, 0)$, $\tau_{xy}(x, 0)$, $u = u(x, y)$ и $v = v(x, y)$ вдоль осей x и y можно тогда найти из соотношений

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2\mu}(\sigma_x - \frac{\nu}{\nu + 1}\sigma), \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{2\mu}(\sigma_y - \frac{\nu}{\nu + 1}\sigma), \tag{7}$$

$$\text{где } \sigma = \sigma_x + \sigma_y; \nu = \frac{\lambda_0}{2(\lambda_0 + \nu)}; \mu = \frac{E}{2(\lambda_0 + \nu)}. \tag{8}$$

здесь μ, ν – упругие константы; λ_0 – коэффициент Ляме; E – модуль Юнга.

Далее мы ограничимся случаем $g(x) = \hat{g}(\lambda) = 0$, т.е. будем считать, что компонента τ_{xy} при $y = 0$ пренебрежимо мала, что легко следует из физических соображений. Нетрудно видеть, что тогда формулы (3)–(5) можно переписать как

$$\sigma_x(x, y) = A(x, y) + y \frac{\partial A(x, y)}{\partial y}, \quad \sigma_y(x, y) = A(x, y) - y \frac{\partial A(x, y)}{\partial y}, \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = -y \frac{\partial A}{\partial x},$$

где $A(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\lambda) e^{-|\lambda|y - i\lambda x} d\lambda \quad (\hat{f}(\lambda) = \overline{\hat{f}(-\lambda)}), \quad (10)$

причем эта функция удовлетворяет уравнению Лапласа в области R_+^2 :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0, \quad (11)$$

и граничному условию (2), т.е. является решением задачи Дирихле для этой области. Таким образом, задача сводится к вычислению интеграла (10) (либо эквивалентно, к использованию хорошо известного решения для полуплоскости [9]).

Теперь, для практического решения поставленной задачи, необходим конкретный выбор функции $f(x)$ отражающий простейшие, и в то же время важнейшие ситуации, которые могут встретиться в реальности. Заметим, что в силу известного классического принципа Сен-Венана (см., например, [11]), детали внешнего воздействия на упругую среду для статически эквивалентных (в смысле совпадения главного вектора и главного момента) могут сказаться (как на полях напряжений, так и на полях отвечающих им деформаций) лишь вблизи области его приложения и весьма незначительны на дальних расстояниях от этой области. В нашем случае, поскольку характерная глубина залегания тектонических плит составляет порядка десятков километров, этот (асимптотический) принцип может считаться выполненным с хорошей степенью точности при вариациях внешних нагрузок в переходной области на характерных расстояниях порядка километров. Например, если задать

$$f_R(x) = c_R, \quad \text{если } 0 < x < a, \quad f_L(x) = c_L, \quad \text{если } -b < x < 0, \quad (12)$$

где c_R, c_L a, b – заданные константы; $c_R \neq c_L$ (здесь $a, b > 0$ – характерные безразмерные горизонтальные размеры циклона и антициклона соответственно; c_R, c_L – величины безразмерных давлений в них, приходящиеся на единицу длины), то из (10) следует, что

$$A(x, y) = \frac{c_R}{\pi} \left[\arctan \frac{x}{y} - \arctan \frac{x-a}{y} \right] + \frac{c_L}{\pi} \left[-\arctan \frac{x}{y} + \arctan \frac{x+b}{y} \right]. \quad (13)$$

Это соотношение представляет собой функцию Грина задачи Дирихле. С учетом (9) отсюда находим, что

$$\sigma_x(x, y) = A(x, y) - \frac{1}{\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \left[ac_R \frac{y^2 - x^2 - ax}{(x - a)^2 + y^2} + bc_L \frac{y^2 - x^2 - bx}{y^2 + (x + b)^2} \right], \quad (14)$$

$$\sigma_y(x, y) = A(x, y) + \frac{1}{\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \left[ac_R \frac{y^2 - x^2 - ax}{(x - a)^2 + y^2} + bc_L \frac{y^2 - x^2 - bx}{y^2 + (x + b)^2} \right],$$

$$\tau_{xy}(x, y) = -\frac{1}{\pi} \frac{y^4}{x^2 + y^2} \left[ac_R \frac{a - 2x}{y^2 + (x - a)^2} - bc_L \frac{b + 2x}{y^2 + (x + b)^2} \right].$$

В частном случае при $c_R = c_L = c_0$, $b = a$ имеем: $\varphi(x) = c_0 + p_0$ и из (13) получаем (принимая во внимание поведение ветвей арктангенса) известный результат [20]:

$$A(x, y) = \frac{c_0}{\pi} \arctan \frac{2ay}{y^2 + x^2 - a^2}, \quad (15)$$

при этом линии уровня этой функции, т.е. множество точек (x, y) , таких, что $A(x, y) = \text{const}$, описываются на плоскости (x, y) семейством кривых вида $2ay = c_1(x^2 + y^2 - a^2)$, ($c_1 = \text{const}$), которые представляют в пространстве форму купола с центром, расположенном на оси y , и концами – на оси x в точках $\pm a$. Выражения для компонент тензора напряжений тогда перейдут в следующие:

$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= A(x, y) - \frac{2c_0ay}{\pi} \frac{a^2 - x^2 + y^2}{(y^2 + x^2 - a^2)^2 + 4a^2y^2}, \\ \sigma_y(x, y) &= A(x, y) + \frac{2c_0ay}{\pi} \frac{a^2 - x^2 + y^2}{(y^2 + x^2 - a^2)^2 + 4a^2y^2}, \\ \tau_{xy}(x, y) &= \frac{4ac_0xy^2}{\pi} \frac{1}{(y^2 + x^2 - a^2)^2 + 4a^2y^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Это дает возможность сравнить поведение компонент тензора напряжений в невозмущенном случае и в случае возмущения – присутствия системы циклон-антициклон.

4. Численные оценки и обсуждение результатов

Для обсуждаемого механизма инициирования землетрясений важно оценить не абсолютные величины напряжений, возникающих за счет атмосферного давления, а изменения этих величин за исключительно короткие (с сейсмологической точки зрения) промежутки времени.

При проведении численных расчетов нами было принято, что области циклона и антициклона равны величине $D = 1000$ км, размер зоны разлома – $d = 20$ км, перепад давлений в области антициклона и циклона в течение 2 суток составля-

ет $\pm p$, $p = 0,05$ бар. Тогда для добавочных напряжений краевые условия могут быть записаны в виде: $f(x) = -p_0$ при $|x| > D$ или $|x| < d$; $f(x) = -p_0 - p$, при $-D < x < -d$; $f(x) = -p_0 + p$, если $D > x > d$.

На рис. 2 приведены линии уровня максимальных добавочных напряжений сдвига вблизи переходной зоны в области 100 км по глубине и 200 км по горизонтали. Как следует из рисунка, на глубине 30–40 км (граница Мохо) вблизи линии раздела (разлома), максимальные напряжения сдвига составляют 0,03 бар, что эквивалентно сдвиговой нагрузке $\sim 3 \cdot 10^8$ кг на 1 км^2 .

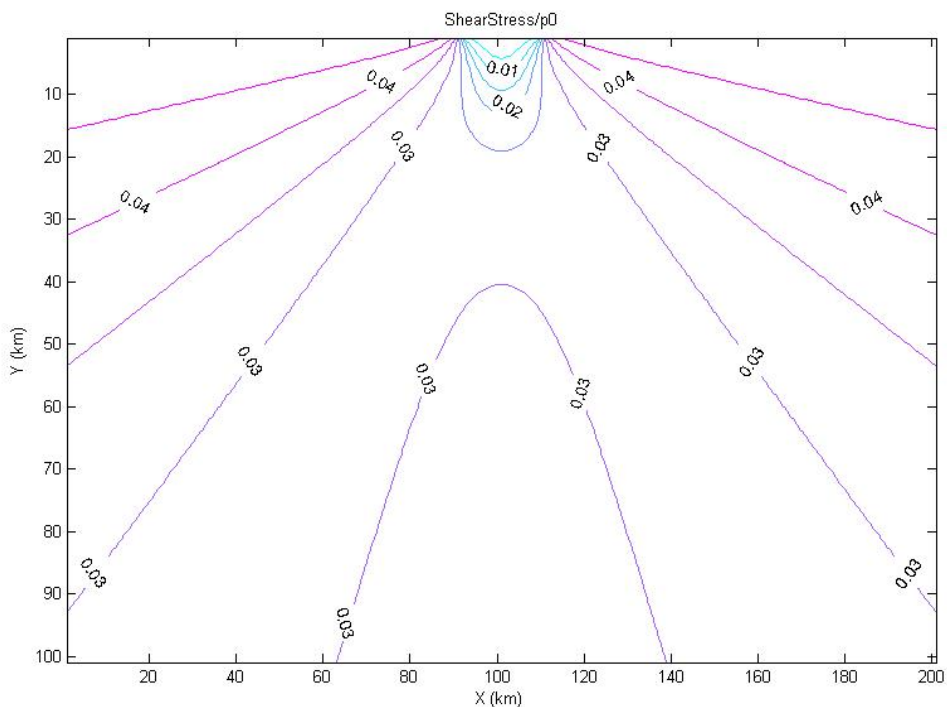


Рис. 2. Линии уровня максимальных напряжений сдвига

Расчеты показывают (рис. 3), что дополнительные максимальные сдвиговые напряжения, обусловленные перепадом давления в системе циклон-антициклон, практически стабилизируются около границы Мохо – эта область соответствует наибольшей повторяемости коровых землетрясений.

Выполненные нами расчеты зависимости углов наклона максимальных дополнительных сдвиговых напряжений от глубины (рис. 4) также выявили следующую особенность: в земной коре (до границы Мохо) углы наклона таких напряжений изменяются в широком диапазоне. Таким образом, этими напряжениями могут быть инициированы физико-химические процессы в дефектах и трещинах различной ориентации.

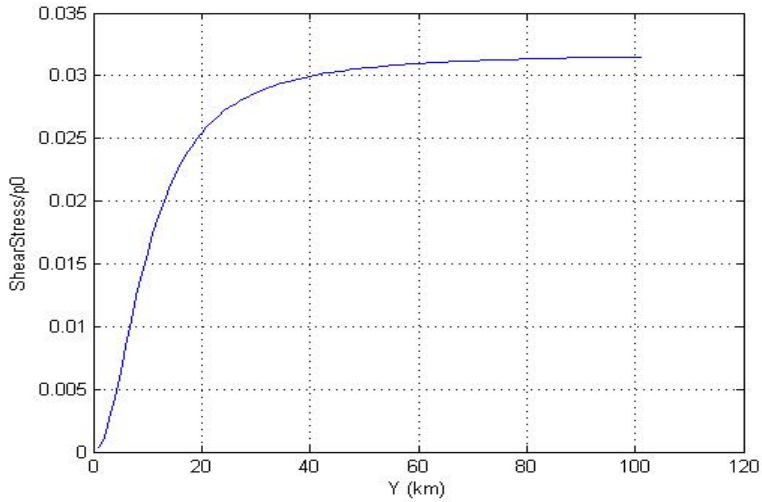


Рис. 3. Зависимость максимальных сдвиговых напряжений от глубины на границе циклона с антициклоном и над тектоническим разломом

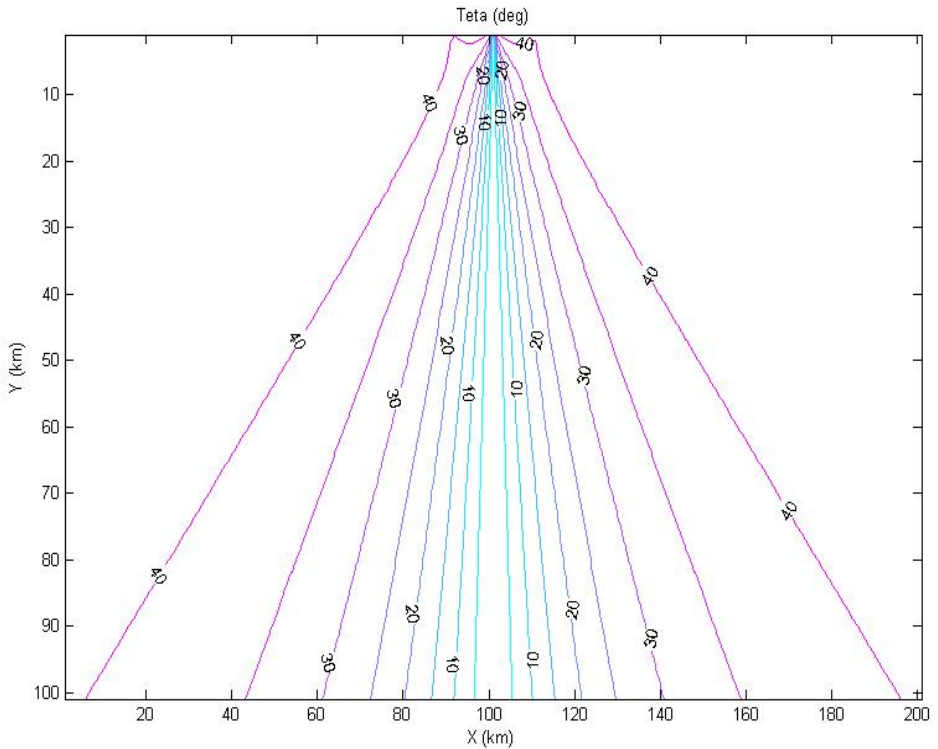


Рис. 4. Углы наклона максимальных дополнительных сдвиговых напряжений

Приведем ряд положений, полученных на основе мониторинга землетрясений.

В начале XX в. сформировалось мнение, что причина землетрясений – это крупномасштабный магистральный разрыв. Однако на практике до сих пор в этом убедиться никому не удалось. Поэтому развивались эксперименты с физикой разрушения монолитных образцов в лабораторных условиях. Разрабатываемые модели представлялись физически достоверными. Аналогичные геофизические измерения проводились при мониторинге землетрясений. В результате, за столетний период исследований лабораторный подход так и не обеспечил сейсмологов необходимыми методами прогноза землетрясений.

Первым с резкой критикой лабораторного подхода к проблеме прогноза землетрясений, выступил академик М.А. Садовский [14]. В конце XX в. было признано, что при исследованиях сейсмичности и поисках предвестников сильных землетрясений данные мониторинга имеют фундаментальную значимость. Сбор и накопление данных мониторинга земной коры вынудили изменить взгляд на геологическую среду, которая ведет себя не как лабораторный образец, а является более сложной системой с большим числом связей с другими геосферами.

Было обнаружено, что сильные землетрясения, происходящие на границах блоков и плит, повторяются в одном и том же месте. Подобные процессы не характерны для монолитного поликристаллического образца. Также определено, что землетрясения (правильнее – крупномасштабные разрывы) не меняют свойств геологической среды, а лишь снимают малую часть фоновой упругой энергии. Поэтому геологическая среда все время находится в состоянии слабой устойчивости и большой энергонасыщенности. В земной коре (до границы Мох) происходят наиболее разрушительные магистральные разрывы, и под давлением верхних толщ геологическая среда переходит в трещиноватое состояние, которое постоянно поддерживается в ней за счет действия флюидов и внешних воздействий. Такое состояние земной коры означает, что более высоких напряжений в подобной среде достичь нельзя. Поэтому и достаточно малые добавки, обусловленные изменением атмосферного давления, могут повлиять на силу сцепления блоков и инициировать землетрясения.

Необходимо отметить, что мы сознательно не касались в данной статье пространственного распределения подземных вод. Однако пространственные изменения атмосферного давления приводят, в частности, и к соответствующим пространственным изменениям подземных вод, которые также создают дополнительные напряжения на разломах геоблоков и плит. Суммарное воздействие атмосферного давления и потоков подземных вод увеличивает дополнительные напряжения в зоне разломов [7].

5. Заключение

Как следует из приведенных расчетов, добавочные напряжения, вызванные атмосферными процессами, исчезающе малы по сравнению как с литостатиче-

скими напряжениями (различие на 3–4 порядка), так и с экспериментально наблюдаемыми напряжениями при землетрясениях [13]. Однако характерной особенностью дополнительных напряжений, вызванных изменениями атмосферной циркуляции, являются:

1) их импульсный характер по сравнению с тектоническими процессами – быстротечность (характерные времена отличаются на 3–4 порядка). Это приводит к тому, что активизируются релаксационные процессы при изменении уровня давления на земную кору, при этом активизация процессов релаксации способствует разрядке локальных избыточных напряжений.

2) большие объемы энергии, которые могут выделиться локально; процессы разрушения (распространения трещин) в твердой оболочке, имеющие характерные размеры 10 км, являются локальными процессами по сравнению с атмосферными процессами, характерные размеры которых составляют более 1000 км [16].

В работе [1] обсуждаются два аспекта физики землетрясения, полагая, что, с одной стороны, землетрясение – это сейсмический разрывный источник, в котором происходит скольжение по плоскости разрыва, и, с другой стороны – это объемный источник, связанный с внезапным расширением очаговой области. Первый источник связан со смещением, второй – с деформациями. В данной статье мы связываем триггерный эффект со скольжением по плоскости разрыва. Наши расчеты показали, что дополнительные напряжения, связанные с системой циклон-антициклон, вероятно, не могут повлиять на смещение земной коры в разломной зоне (для расходящихся плит и геоблоков расчеты не производились). Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на изучение смещений в результате прогиба земной коры под влиянием системы циклон-антициклон.

Следует ожидать, что при указанных условиях разрушение в твердой оболочке достаточно хорошо описывается моделью хрупкого разрушения в упруго-пластических телах [18–19]. При таком подходе необходимо принимать во внимание концентрацию напряжений у вершины трещины, что может существенно повлиять на результаты расчетов. Изучение процессов с такой точки зрения является целью дальнейших исследований.

Таким образом, в данной статье представлено сравнительно простое исследование, отражающее лишь одну грань возможного влияния изменения атмосферных процессов на увеличение сейсмичности. Для более адекватного описания и оценки этого влияния требуется, как видно из вышеизложенного, последующее уточнение действия соответствующих физических механизмов и их учета в математической модели.

Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1-2. – М.: Мир, 1983. – 880 с.
2. Бокв В.Н. О перспективах использования солнечно-атмосферных связей в прогнозировании сейсмичности Земли // Изв. РГО РАН, 2000, т. 132, вып. 4, с. 38-46.

3. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // Изв. РГО РАН, 2003, т. 135, вып. 6, с. 54-65.
4. *Боков В.Н.* Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // Уч. зап., 2008, № 6, с. 139-147.
5. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* О связи сильных землетрясений с атмосферной циркуляцией в сезонном и межгодовом диапазонах изменчивости // Сб. трудов конф. «Юбилейные чтения памяти А.Л. Чижевского, посвященные 110-летию ученого», 27–30 ноября 2007 г. – СПб.: изд. Политех. ун-та, 2007, с. 51-56.
6. *Боков В.Н.* О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Уч. зап. 2010, № 14, с. 89-100.
7. *Боков В.Н.* Увеличение интенсивности проявления геофизических предвестников землетрясений под влиянием изменчивости атмосферного давления / В кн. Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей // Сб. мат. V меж. конф. чтения Булашевича, УрО РАН, Екатеринбург, 2009, с. 46-50.
8. *Гольдин С.В., Кучай О.А.* Сейсмотектонические деформации алтае-саянской сейсмоактивной области и элементы коллизионно-блочной геодинамики // Геология и геофизика, т. 48, 2007, № 7, с. 692-723.
9. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики. – М.: Москва, 1988. – 512 с.
10. *Николаевский В.Н.* Трещиноватость земной коры как ее генетический признак // Геология и геофизика, 2006, т. 47, № 5, с. 646-656.
11. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Москва, 1975. – 872 с.
12. *Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли, 1996, № 4, с. 5-11.
13. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясения // Докл. РАН, 2005, т. 400, № 3, с. 372–377.
14. *Садовский М.А.* Предвестники сейсмических ударов и предсказание землетрясений // Вестн. АН СССР, 1971, № 11, с. 11-17.
15. *Сытинский А.Д.* Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 100 с.
16. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
17. *Уфлянд Я.С.* Интегральные преобразования в задачах теории упругости. – Л.: Наука, 1968. – 402 с.
18. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974.
19. *Финкель В.М.* Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. – М.: Metallургия, 1970.
20. *Debnath L.* Nonlinear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers, Birkhauser-Boston, 1997. – 591 p.

Работа (В.Н. Бокова и Е.Ш. Гутшабаша) выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки.