

# 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  $\tau$  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/км<sup>2</sup>). 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  $\tau$ . 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].

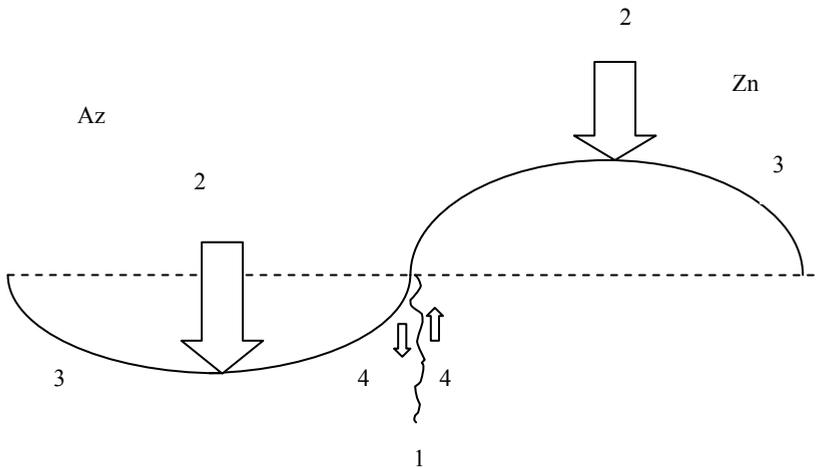


Рис. 1. Атмосферные воздействия на тектоническом разломе

### 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  $\mu, \nu$  – упругие константы;  $\lambda_0$  – коэффициент Ляме;  $E$  – модуль Юнга.

Далее мы ограничимся случаем  $g(x) = \hat{g}(\lambda) = 0$ , т.е. будем считать, что компонента  $\tau_{xy}$  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  $1 \text{ км}^2$ .

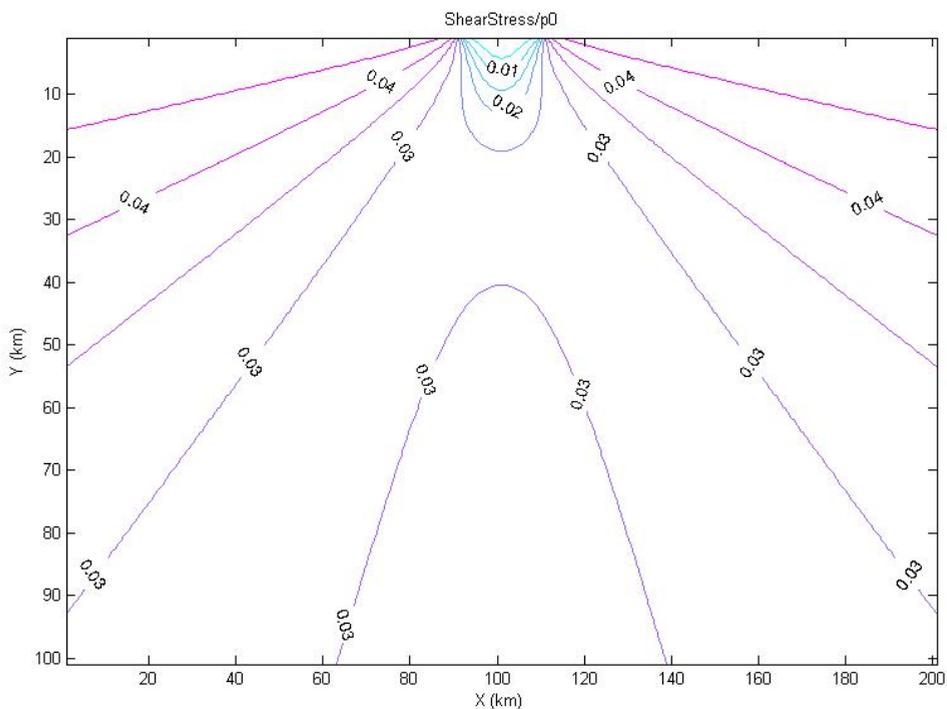


Рис. 2. Линии уровня максимальных напряжений сдвига

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.

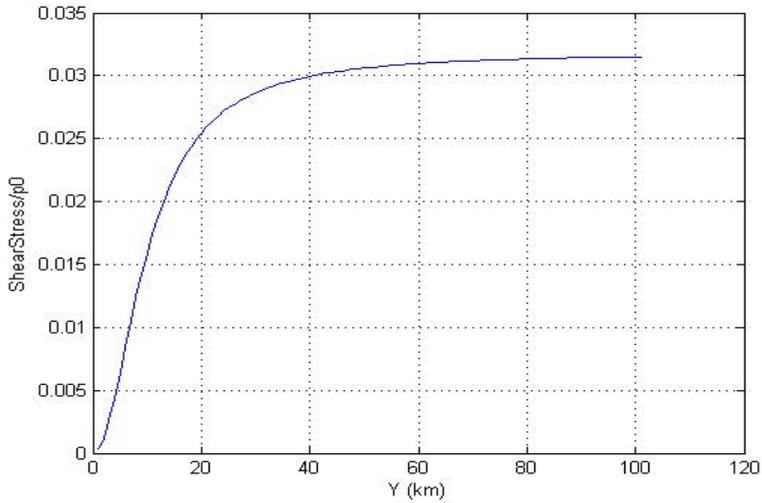


Рис. 3. Зависимость максимальных сдвиговых напряжений от глубины на границе циклона с антициклоном и над тектоническим разломом

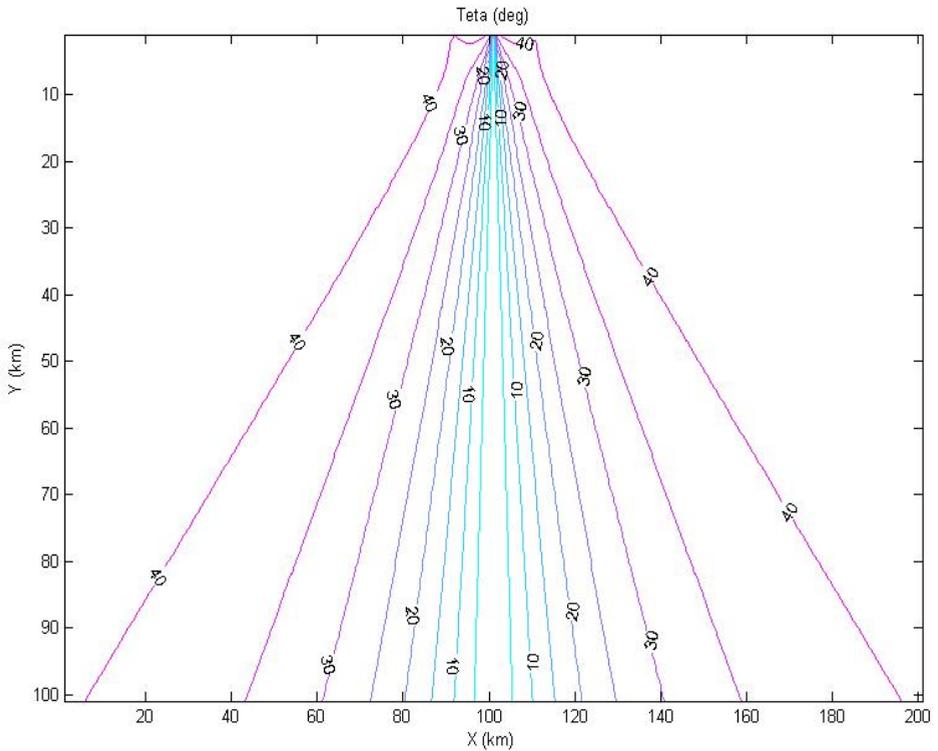


Рис. 4. Углы наклона максимальных дополнительных сдвиговых напряжений

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.: Металлургия, 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.