

## Работы молодых ученых

УДК 550.3

### О ЗОНАХ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В УПРУГОМ ПРИБЛИЖЕНИИ СРЕДЫ

© 2009 А.С. Пережогин

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, 684034; e-mail: drew72156@yandex.ru*

Представлены модельные расчеты зон геоакустической эмиссии и дилатансии, объясняющие наличие геоакустических сигналов в земной коре на большом удалении от дипольного источника напряжений. Показан характер зон дилатансии и геоакустической эмиссии на поверхности земной коры.

*Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, напряженно-деформированное состояние, дилатансия.*

#### ВВЕДЕНИЕ

На камчатском геодинамическом полигоне проводятся наблюдения геоакустической эмиссии в открытых водоемах (Купцов, 2005; Купцов и др., 2005). Метод акустико-эмиссионного контроля является чувствительной формой наблюдения за изменением напряженно-деформированного состояния среды. В настоящей работе предлагается модель поля напряжений земной коры, описывающая наблюдаемые эффекты геоакустической эмиссии (Гордиенко и др., 2006). В экспериментах (Гордиенко и др., 2006; Купцов, 2005) было установлено, что за несколько часов до сейсмического события происходит повышение интенсивности геоакустического сигнала на большом удалении от эпицентра. Следствием возрастания геоакустической эмиссии является перестройка напряженно-деформированного состояния горных пород земной коры, предвещающая землетрясение.

Вариации различных геофизических полей в сейсмоактивных регионах связывают с зонами дилатансии (Алексеев и др., 2001). В приближении упругого изотропного полупространства (Алексеев и др., 2001) показано наличие зон нелинейного разуплотнения (дилатансии) геосреды, которые образуются в окрестности очагов землетрясений при напряжениях близких к

разрушительным значениям для горных пород. Повышение интенсивности геоакустической эмиссии может происходить как при критических напряжениях горных пород, так и при напряжениях на несколько порядков меньше, чем в случае дилатансии горных пород. В работе (Водинчар и др., 2007) показано пространственное распределение зон геоакустической эмиссии с помощью модели простой сосредоточенной силы в упругом изотропном полупространстве. В настоящей работе в качестве источника напряжений в упругом однородном полупространстве рассматривается двойная сила, как источника напряжений в очаге землетрясения (Райс, 1982). На основе данной модели расчет пространственного распределения зон геоакустической эмиссии показывает область влияния деформационного поля на появление геоакустических сигналов в районе пунктов наблюдений на расстоянии сотни километров от эпицентра подготовки сейсмического события.

#### ЗОНЫ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ДИЛАТАНСИИ

В качестве модели земной коры рассмотрим упругое однородное изотропное полупространство. Вблизи свободной поверхности полупространства действует сосредоточенная двойная

сила. В линейной теории упругости математическая модель называется задачей Миндлина в случае двойной силы (Mindlin, Cheng, 1950). Компоненты тензора напряжений для упругого изотропного тела выражаются через вектор Галеркина (Новацкий, 1975; Mindlin, Cheng, 1950)  $\mathbf{H} = \mathbf{i}X + \mathbf{j}Y + \mathbf{k}Z$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= 2(1-\nu)\frac{\partial}{\partial x}\Delta X + (\nu\Delta - \frac{\partial^2}{\partial x^2})\text{div}\mathbf{H} \\ \sigma_{yy} &= 2(1-\nu)\frac{\partial}{\partial y}\Delta Y + (\nu\Delta - \frac{\partial^2}{\partial y^2})\text{div}\mathbf{H} \\ \sigma_{zz} &= 2(1-\nu)\frac{\partial}{\partial z}\Delta Z + (\nu\Delta - \frac{\partial^2}{\partial z^2})\text{div}\mathbf{H} \\ \sigma_{yz} &= (1-\nu)\left(\frac{\partial}{\partial z}\Delta Y + \frac{\partial}{\partial y}\Delta Z\right) - \frac{\partial^2}{\partial y\partial z}\text{div}\mathbf{H} \\ \sigma_{zx} &= (1-\nu)\left(\frac{\partial}{\partial x}\Delta Z + \frac{\partial}{\partial z}\Delta X\right) - \frac{\partial^2}{\partial x\partial z}\text{div}\mathbf{H} \\ \sigma_{xy} &= (1-\nu)\left(\frac{\partial}{\partial y}\Delta X + \frac{\partial}{\partial x}\Delta Y\right) - \frac{\partial^2}{\partial x\partial y}\text{div}\mathbf{H} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты вектора Галеркина  $\mathbf{H}$ ;  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy}$  – компоненты тензора напряжений;  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Различным сосредоточенным источникам напряжений в упругом теле соответствует свой вектор Галеркина. Выражение для вектора Галеркина  $\mathbf{H}$  в случае двойной силы в направлении оси  $OX$  имеет вид (Mindlin, Cheng, 1950):

$$\begin{aligned} X &= \frac{Mx}{8\pi(1-\nu)}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} + \frac{2c^2}{R_2^3}\right) \\ Y &= 0 \\ Z &= \frac{M}{8\pi(1-\nu)}\left(\frac{2c}{R_2} - \frac{2cx^2}{R_2^3} + 2(1-2\nu)\ln(R_2+z+c) + \frac{2(1-2\nu)x^2}{R_2(R_2+z+c)}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $(0, 0, c)$  – точка приложения двойной силы,  $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-c)^2}$ ,  $R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+c)^2}$ ,  $M$  – величина двойной силы.

Поле напряжений в точке  $(x, y, z)$  полупространства вычисляется подстановкой координат вектора Галеркина  $\mathbf{H} = \mathbf{i}X + \mathbf{j}Y + \mathbf{k}Z$  (2) в систему (1). Аналитические выражения тензора напряжений в явном виде не приводятся в силу их громоздкости.

Геоакустическая эмиссия является следствием образования трещин, движения по готовым разломам или границам неоднородностей в среде. Интенсивность геоакустического сигнала

определяется значениями поля напряжений. Геоакустическая эмиссия будет ярко проявляться при напряжениях геосреды близких к разрушительным. При меньших уровнях напряжений геоакустический отклик среды будет наблюдаться, но с меньшей интенсивностью.

В работе (Алексеев и др., 2001) использовался критерий разуплотнения горных пород  $D_\tau = \tau - \alpha(P + \rho gz) - S \geq 0$ , где

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right)^{\frac{1}{2}}$$

– интенсивность касательных напряжений,  $P = -(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$  – давление,  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения,  $\rho$  – плотность породы,  $g$  – ускорение свободного падения,  $z$  – координата точки,  $S$  – сцепление породы. Напряжения рассчитываются по модели Миндлина с сосредоточенным источником в виде двойной силы. К области дилатансии относится та часть полупространства, где выполняется условие  $D_\tau \geq 0$ , которое означает, что касательные напряжения доминируют над сжатием, что и приводит к возникновению трещин и разуплотнению пород. Для параметров расчета  $D_\tau$  выбраны следующие значения:  $c = 15000$  м,  $\nu = 0.25$ ,  $E = 8.7 \cdot 10^{10}$  Па (модуль упругости),  $\rho = 2900$  кг/м<sup>3</sup>,  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $Y = 3 \cdot 10^6$  Па,  $\alpha = 0.5$ ,  $M = 5 \cdot 10^{22}$  Н·м.

Зоны дилатансии на поверхности имеют пространственное распределение в пределах первых сотен километров (рис. 1а). На рис. 1б показана очаговая зона дилатансии. Пространственное распределение зоны дилатансии в случае двойной силы качественно согласуется с моделью зон для простой сосредоточенной силы в работе (Алексеев и др., 2001). Выделяется поверхностная и очаговая зоны дилатансии.

В зонах дилатансии повышение интенсивности геоакустической эмиссии будет существенным, так как в области будет происходить активное раскрытие трещин. В геологической среде интенсивность геоакустической эмиссии может проявляться при деформациях и напряжениях, не достигающих разрушительных значений.

Зоны геоакустической эмиссии определим по уровням сдвиговых деформаций:  $10^{-8}$ – $10^{-7}$ ,  $10^{-7}$ – $10^{-6}$ ,  $10^{-6}$ – $10^{-5}$ . Предполагается, что сдвиговые деформации являются определяющими в силу того, что прочность пород на сжатие на порядки больше чем на сдвиг. Минимальные значения сдвиговых деформаций соответствуют приливным деформациям, а максимальные – пределу прочности и образованию зоны нелинейного разуплотнения.

Для вычисления зон геоакустической эмис-

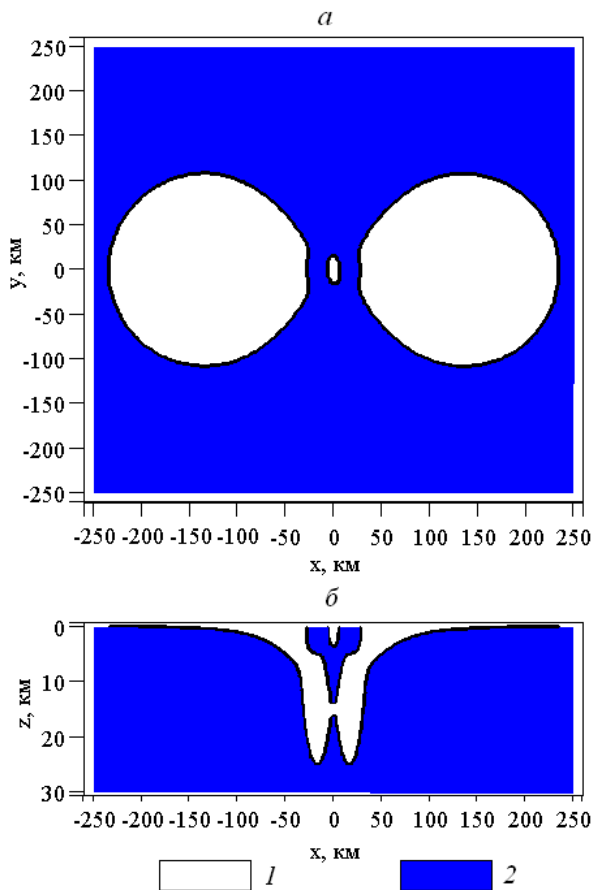


Рис. 1. Зона дилатансии: *a* - на поверхности  $z = 0$ ; *b* - в сечении  $y = 0$ . 1 - зона дилатансии; 2 - область без нелинейного разуплотнения.

сии используем величину  $\varepsilon_{\max} = (1 + \nu)\sigma_{\max} / E$ , где  $\sigma_{\max} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) / 2$  - максимальное касательное напряжение (Новацкий, 1975),  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные значения тензора напряжений. Параметры упругого полупространства совпадают с параметрами расчета зон дилатансии.

На рис. 2 показаны зоны геоакустической эмиссии на поверхности  $z=0$  в случае двойной силы с  $M = 5 \cdot 10^{18}$  Н·м. Выбранный параметр источника напряжения соответствуют землетрясениям с энергетическим классом  $K > 12$ , у которых геоакустические эффекты наблюдаются хорошо (Купцов, 2005). Согласно модельным расчетам, зоны геоакустической эмиссии по уровню относительных деформаций больше  $10^{-8}$  простираются на расстояния более сотни километров от эпицентров землетрясений, что объясняет повышение интенсивности в геоакустической эмиссии на большом удалении от области подготовки сейсмического события.

Зоны дилатансии, заданные критерием  $D_\tau$  (рис. 1а), и зоны геоакустической эмиссии, определяемые величиной  $\varepsilon_{\max}$  (рис. 2), имеют схожее распределение на поверхности земной коры в дальней зоне от сосредоточенного ис-

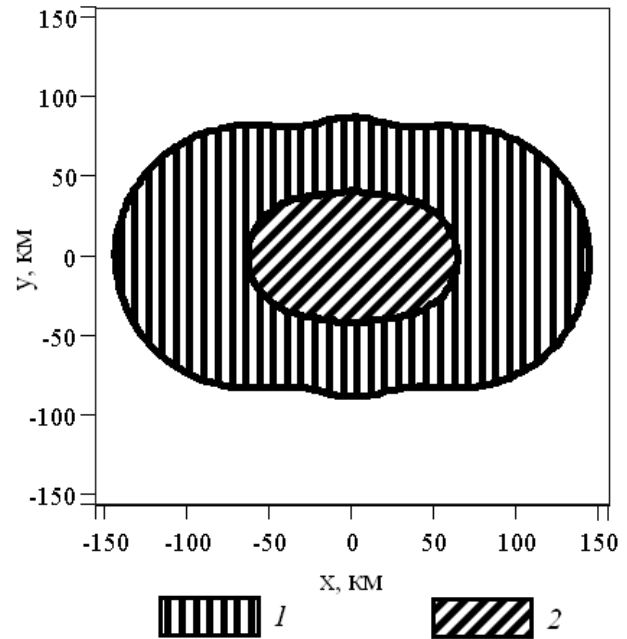


Рис. 2. Области сдвиговых деформаций, задаваемые критерием  $\varepsilon_{\max}$ . 1 - область относительных деформаций  $10^{-8}$ - $10^{-7}$ ; 2 - область относительных деформаций  $>10^{-7}$ .

точника напряжений. Однако, зоны нелинейного разуплотнения образуются при значениях источника поля напряжений на несколько порядков больше, чем для зон геоакустической эмиссии. Следовательно, зоны геоакустической эмиссии имеют больше пространственное распределение, и геоакустические эффекты могут проявляться на значительном удалении от области подготовки землетрясений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе решений задачи для двойной силы в упругом полупространстве с использованием критерия максимальных касательных напряжений построены модели зон геоакустической эмиссии. Результаты вычислений позволили объяснить проявление геоакустических эффектов на большом удалении от очагов подготовки землетрясений. Показано, что зоны геоакустической эмиссии имеют схожее пространственное распределение с зонами дилатансии, но большее пространственное распределение.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору Б.М. Шевцову за обсуждение полученных результатов и ценные советы по написанию статьи.

### Список литературы

Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного про-

- гноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 81-97.
- Водинчар Г.М., Пережогин А.С., Сагитова Р.Н., Шевцов Б. М.* Моделирование зон геоакустической эмиссии // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 59-63.
- Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др.* Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // ДАН. 2006. Т. 407. С. 669-672.
- Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45-59.
- Купцов А.В.* Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // Физика Земли. 2005. № 10. С. 59-65.
- Новацкий В.* Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
- Райс Дж.* Механика очага землетрясения / Под ред. Николаевского В.Н. М.: Мир, 1982. 217 с.
- Mindlin R.D., Cheng D.H.* Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid // Journal of Applied Physics. 1950. V. 21. P. 926-930.

## GEOACOUSTIC EMISSION ZONES IN AN ELASTIC MODEL OF CONTINUUM

**A.S. Perezhogin**

*Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEBRAS, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, 684034; e-mail: drew72156@yandex.ru*

The paper considers the modeling of the zones of the geo-acoustic emission and dilatancy. The zones explain why the geo-acoustic signals in the crust are located far from the dipole tension source. The paper shows the zones features of dilatancy and geo-acoustic emission on the surface of the crust.

*Keywords: geo-acoustic emission, mode of deformation, dilatancy.*