


ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 004.942, 51-73:550.3, 550.394



Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений

*М. И. Гапеев**, *А. А. Солодчук*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7, Россия

Аннотация. Основная гипотеза возникновения предсейсмических аномалий направленности геоакустической эмиссии состоит в том, что на заключительной стадии подготовки землетрясения формируются постоянные направления осей главных напряжений пород в точке наблюдений. Направления этих осей в свою очередь определяют преимущественную ориентацию акустических источников. Для подтверждения этой гипотезы произведено моделирование ориентации осей главных напряжений, обусловленных процессом подготовки землетрясений. Расчеты основаны на модели, построенной в рамках линейной теории упругости: земная кора рассматривается в виде однородного изотропного упругого полупространства, силовое воздействие в очаге готовящегося землетрясения — в виде комбинации двойных пар сил. Учтена потенциальная энергия упругих деформаций, накопленная в процессе подготовки землетрясения. В работе использован каталог механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog». Из него были выбраны параметры сейсмических событий, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 по 2020 годы. Так как ориентация акустического излучения зависит от азимутального направления на эпицентры землетрясений, то все рассматриваемые сейсмические события были разделены на три группы методом К-средних по пространственному расположению их эпицентров. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными оценками направления осей главных напряжений в пункте наблюдений «Микижа» (52,99° с. ш., 158,22° в. д.). Оценки были получены ранее по аномалиям направленности геоакустической эмиссии. Показано, что гистограммы распределения направлений осей главных напряжений согласуются с результатами экспериментальных оценок для двух групп землетрясений. Модальные интервалы и локальные максимумы гистограмм распределения попадают в диапазоны оценок ориентации осей главных напряжений от 290° до 320° и от 20° до 50° соответственно.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, предсейсмические аномалии, математическое моделирование, оси главных напряжений.

Получение: 18.10.2024; Исправление: 11.11.2024; Принятие: 25.11.2024; Публикация онлайн: 28.11.2024

Для цитирования. Гапеев М. И., Солодчук А. А. Моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 171-184. EDN: RHEQMO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184>.

Финансирование. Исследование выполнено за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2)

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: gapeev.sci@yandex.ru


Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Гапеев М. И., Солодчук А. А., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86-10



Modeling of the Directions of Rock Principle Stress Axes During Earthquake Preparation

*M. I. Gapeev**, *A. A. Solodchuk*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS,
684034, Paratunka, Mirnaya Str., 7, Russia

Abstract. The process of rock stress-strain state change causes acoustic radiation, which is called rock acoustic emission or geoacoustic emission. The relation between the earthquake preparation process and rock acoustic emission variations, which are called pre-seismic anomalies, has been stated in a number of investigations. The general mechanism of occurrences of these anomalies is associated with the fact that formation of a preparing earthquake source causes changes in the stress-strain state of rocks, surrounding it. One of the kinds of anomalies, occurring at the final stage of earthquake preparation, is the appearance of clearly expressed direction of acoustic activity. The main hypothesis of occurrence of this phenomenon is that a preparing earthquake source impact causes formation of constant direction of principle stress axes at an observation point. In their turn, the direction of these axes determines the primary orientation of acoustic radiation sources. To confirm this hypothesis, axis orientations of the main stresses, determined by the earthquake preparation process, were modeled. The estimates are based on the model constructed within the framework of elasticity linear theory where the Earth crust is considered in the form a homogeneous isotropic elastic half-space and the force impact at a preparing earthquake source is considered in the form of a combination of forces double pairs. Elastic deformation potential energy, accumulated during the earthquake preparation process, is taken into account. In the paper, we used the data from the catalog of earthquake source mechanics «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» on seismic events occurred near Kamchatka peninsula from 1976 until 2020. As long as the acoustic radiation direction depends on the azimuthal direction to earthquake epicenter, all the considered seismic events were divided into three groups by the method of K-averages according to spatial locations of their epicenters. The modeling results were compared with experimental estimates of the main stress axis directions at Mikizha observation site (52.99° N, 158.22° E). The estimates were earlier obtained based on the geoacoustic emission directivity anomalies. It was shown that histograms of main stress axis direction distributions agree with the results of estimates for two groups of earthquakes. Modal intervals of distribution histograms fall within the range of experimental estimates from 290° to 320° and from 20° to 50° accordingly.

Key words: geoacoustic emission, pre-seismic anomalies, mathematical modeling, main stress axes.


Received: 18.10.2024; Revised: 11.11.2024; Accepted: 25.11.2024; First online: 28.11.2024

For citation. Gapeev M. I., Solodchuk A. A. Modeling of the directions of rock principle stress axes during earthquake preparation. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 171-184. EDN: RHEQMO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-171-184>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No. 124012300245-2)

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: gapeev.sci@yandex.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Gapeev M. I., Solodchuk A. A., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Процесс изменения напряженно-деформированного состояния горных пород приводит к возникновению акустического излучения, которое называется акустической эмиссией горных пород или геоакустической эмиссией. Источники этого излучения имеют дислокационную природу и могут быть обусловлены упругими [1], пластическими [2] или гранулированными свойствами среды [3].

В ряде исследований [4–6] установлена связь между процессом подготовки землетрясений и вариациями акустической эмиссии горных пород, которые в этом случае называют предсейсмическими аномалиями геоакустической эмиссии. Общий механизм возникновения этих аномалий связан с тем, что формирование очага готовящегося землетрясения вызывает изменение напряженно-деформированного состояния пород, окружающих его.

Одним из видов аномалий, проявляющихся на заключительной стадии подготовки землетрясений, является возникновение ярко выраженных направлений акустической активности [7]. Основная гипотеза возникновения этого явления заключается в том, что влияние очага готовящегося землетрясения приводит к формированию постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений. Направления этих осей в свою очередь определяют преимущественную ориентацию источников акустического излучения.

В настоящей работе для подтверждения выдвинутой гипотезы произведено математическое моделирование направления осей главных напряжений, возникающих в горных породах при подготовке землетрясений вблизи полуострова Камчатка. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными оценками направления осей главных напряжений по данным аномалий направленности акустической эмиссии горных пород в пункте наблюдений «Микижа» (52,99° с. ш., 158,22° в. д.) [8].

Физическая постановка задачи

Направленность геоакустической эмиссии. В процессе генерации акустического излучения горными породами преобладают сдвиговые источники. Это связано с тем, что прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию. Преимущественная ориентация таких источников определяется направлением максимальных касательных напряжений, ориентированных в основном под углом 45° к оси наибольшего сжатия [9, 10]. При этом максимумы продольных акустических колебаний соответствуют направлениям, перпендикулярным этой оси для волны сжатия и совпадающим с ней для волны разряжения. Диаграммы направленности акустических колебаний сдвиговых источников схематично представлены на рис. 1.

Под влиянием очага готовящегося землетрясения будет возникать большое количество одинаково ориентированных источников акустического излучения. Это

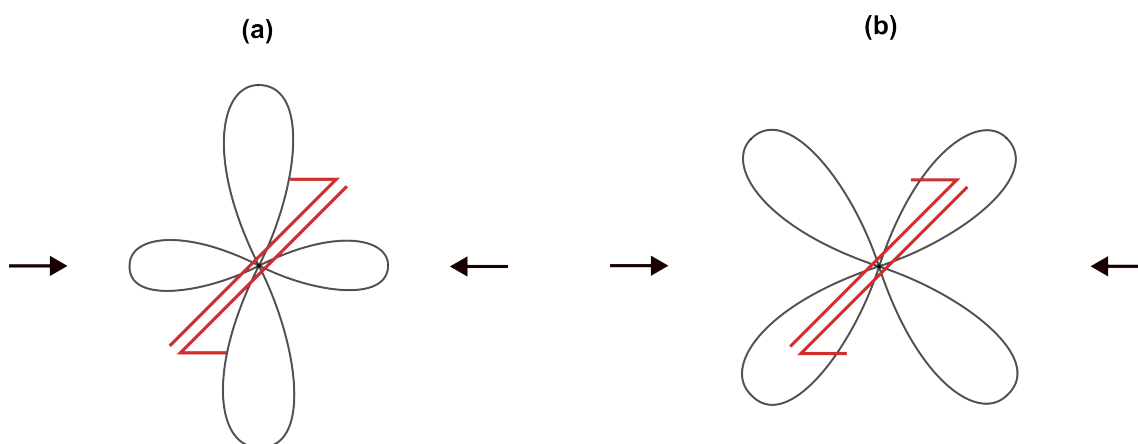


Рис. 1. Диаграммы направленности продольных (а) и поперечных (б) акустических колебаний сдвиговых источников. Стрелками показана ось наибольшего сжатия.

[Figure 1. Directivity diagrams of longitudinal (a) and transverse (b) acoustic oscillations of shear sources. Arrows indicate the strongest compression axis.]

обусловлено возникновением постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений.

Так, например, проведенный анализ аномалий направленности геоакустической эмиссии, зарегистрированной в пункте наблюдения «Микижа» ($52,99^\circ$ с. ш., $158,22^\circ$ в. д.) на полуострове Камчатка в 2008 – 2012 гг., показал следующие результаты [8].

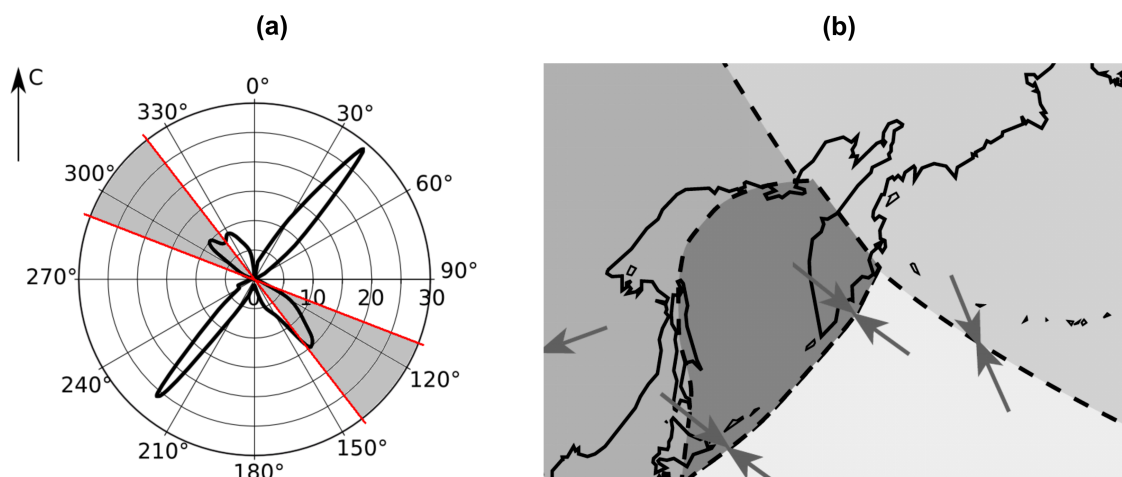


Рис. 2. Оценка ориентации оси максимального сжатия перед 74 землетрясениями в период 2008 – 2012 гг., — область ориентации оси сжатия (а). Ориентация тектонических напряжений у побережья Камчатки, $\longrightarrow \longleftarrow$ — направление осей горизонтального сжатия (б) [8].

[Figure 2. Estimate of the compression axis orientation before 74 earthquakes within the period 2008–2012 (a), — the compression axis orientation region. Orientation of tectonic stresses near the Kamchatka peninsula, $\longrightarrow \longleftarrow$ — direction of horizontal compression axes (b) [8].]

Максимумы акустической активности регистрировались с направлений близких к 40° и 220°, несколько реже – с направлений 140° и более широкого диапазона 300° – 340°. На основании этих данных были получены оценки направления осей главных напряжений. Диапазон направления осей главных напряжений изменялся в интервале углов 110° – 140° со средним значением в 125° (рис. 2а). Полученный усредненный результат оценки ориентации оси совпал с генеральным направлением действия тектонических напряжений у побережья Южной Камчатки (рис. 2б).

Модель очага землетрясения. Очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности материала Земли, который возникает под действием упругих сдвиговых напряжений, накопленных в процессе тектонической деформации. В момент землетрясения происходит полное или частичное снятие накопленных напряжений в его очаге. Соответствующий очагу тектонического землетрясения разрыв является разрывом скольжения, то есть взаимное перемещение его берегов по нормали к поверхности разрыва равно нулю. Данное определение тектонического землетрясения было сформулировано Б. В. Костровым и основано на теории упругой отдачи Г. Ф. Рейда, которая гласит, что тектоническое землетрясение состоит в превращении части высвободившейся упругой потенциальной энергии в кинетическую энергию сейсмических волн.

Таким образом, деформации, возникающие при подготовке землетрясения, обусловлены приращением потенциальной энергией упругих деформаций ΔW , вызванным процессом подготовки землетрясения. Эта энергия больше, чем высвободившаяся сейсмическая энергия E . Величина η , равная отношению этих энергий, определяет эффективность снятия потенциальной энергии упругих деформаций и называется КПД землетрясения

$$\eta = \frac{E}{\Delta W}. \quad (1)$$

В механике сплошных сред процесс потери устойчивости среды изучается при неизменных свойствах материала среды и без нарушения его сплошности. В рамках этих ограничений описать очаг землетрясения можно через некоторую систему сил, распределенную по поверхности разрыва. Для описания произвольно ориентированного разрыва смещений в изотропной среде используют систему, состоящую из девяти пар двойных сил [11]. Такая система, схематически изображенная на рис. 3, соответствует модели очага землетрясения в виде двойного диполя. Пара двойных сил с моментами является минимально-необходимой системой сил для построения эквивалентного источника.

Принято считать, что фоновый деформационный процесс, протекающий в земной коре, ограничен сверху относительными деформациями порядка 10^{-8} . Такой порядок соответствует приливным деформациям, вызванным в первую очередь влиянием Луны и Солнца. Поэтому в дальнейшем будем считать деформации повышенными, если они превышают этот порог. Так как регистрация

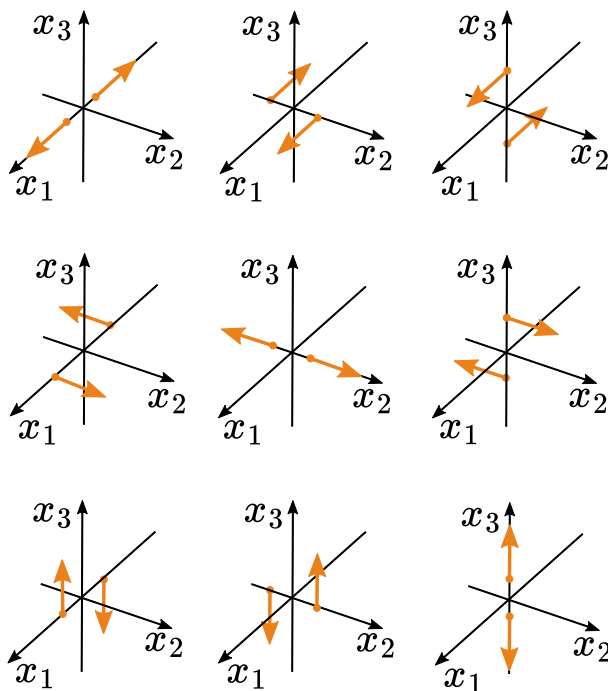


Рис. 3. Девять пар сил, необходимых для получения силового эквивалента при произвольно ориентированном разрыве смещений в среде.

[Figure 3. Nine pairs of forces required to obtain a force equivalent for an arbitrarily oriented displacement gap in the medium.]

геоакустического излучения производится у поверхности земной коры, то ограничимся рассмотрением напряжений и деформаций дневной поверхности.

Математическая постановка задачи

Уравнения и граничные условия. Рассмотрим земную кору в виде упругого однородного изотропного полупространства. Поведение такой среды можно описать при помощи системы дифференциальных уравнений Ламе:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + X_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где u_i — компоненты вектора перемещения, λ, μ — коэффициенты Ламе, X_i — компоненты вектора массовых сил; индексами после запятой обозначено дифференцирование по соответствующим пространственным координатам.

Пусть полупространство занимает область $x_3 \leq 0$. Тогда поверхность Земли задается уравнением $x_3 = 0$. Эта поверхность свободна от напряжений в направлении оси x_3 , следовательно на $x_3 = 0$ заданы граничные условия вида:

$$\sigma_{31}|_{x_3=0} = \sigma_{32}|_{x_3=0} = \sigma_{33}|_{x_3=0} = 0. \quad (3)$$

Напряжения, создаваемые очагом готовящегося землетрясения, стремятся к нулю на бесконечности:

$$\lim_{x_1 \rightarrow \pm\infty} \sigma_{ij} = \lim_{x_2 \rightarrow \pm\infty} \sigma_{ij} = \lim_{x_3 \rightarrow -\infty} \sigma_{ij} = 0. \quad (4)$$

Компоненты вектора массовых сил X , соответствующие системе, изображенной на рис. 3, выражаются следующим образом:

$$X_i = p_{ij} \frac{\partial \delta(x - \xi)}{\partial \xi_j}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где p_{ij} — интенсивность соответствующей пары сил; $\delta(x - \xi)$ — дельта-функция; (ξ_1, ξ_2, ξ_3) — точка приложения системы сил.

Аналитическое решение. Для задачи (2) с граничными условиями (3) и (4) известны функции Грина, полученные Р. Миндлиным. Для единичной силы, приложенной к точке (ξ_1, ξ_2, ξ_3) упругого полупространства и направленной вдоль оси x_3 , функция Грина $g^3(x)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} g_1^3 &= \frac{(x_1 - \xi_1)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} + \frac{6x_3\xi_3}{r_2^5} \right], \\ g_2^3 &= \frac{(x_2 - \xi_2)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} + \frac{6x_3\xi_3(x_3 + \xi_3)}{r_2^5} \right], \\ g_3^3 &= \frac{1}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(3-4\nu)}{r_1} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{r_2} + \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{r_1^3} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(3-4\nu)(x_3 + \xi_3)^2 - 2x_3\xi_3}{r_2^3} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где ν — коэффициент Пуассона, а r_1 и r_2 :

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}, \\ r_2 &= \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Функция Грина $g^1(x)$ для единичной силы, направленной вдоль оси x_1 , выражается в виде:

$$\begin{aligned} g_1^1 &= \frac{1}{16\pi\mu(1-\nu)} \left\{ \frac{3-4\nu}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2}{r_2^3} + \frac{(3-4\nu)(x_1 - \xi_1)}{r_2^3} + \right. \\ &\quad \left. \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)[r_2^2 - (x_1 - \xi_1)^2 - r_2(x_3 + \xi_3)]}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)^2} \right\}, \\ g_2^1 &= \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{1}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)}{r_2^3} - \frac{6x_3\xi_3}{r_2^5} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)^2} \right], \\ g_3^1 &= \frac{(x_1 - \xi_1)}{16\pi\mu(1-\nu)} \left[\frac{(x_3 - \xi_3)}{r_1^3} + \frac{(3-4\nu)(x_3 - \xi_3)}{r_2^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{r_2(r_2 - x_3 - \xi_3)} - \right. \\ &\quad \left. \frac{6x_3\xi_3(x_3 + \xi_3)}{r_2^5} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

Ввиду симметричности задачи, функция Грина $g^2(\mathbf{x})$, соответствующая действию единичной силы вдоль оси x_2 , может быть получена из функции $g^1(\mathbf{x})$ заменой осей x_1 и x_2 . Функции Грина, отвечающие действию двойных сил, могут быть получены дифференцированием функций $g^i(\mathbf{x})$ по пространственным координатам, то есть в виде $\partial g^i(\mathbf{x})/\partial x_j$ [12]. При $i = j$ получим решение для пары двойных сил, направленных вдоль соответствующей оси, при $i \neq j$ — для пары двойных сил, направленных вдоль оси i с моментом относительно оси с номером, отличным от i, j .

В общем случае, решения для смещений в упругом полупространстве можно получить при помощи формулы Вольтерра [13]:

$$u_k(\mathbf{x}) = \int_{\Sigma} s_i(\xi) \sigma_{ij}^k(\xi, \mathbf{x}) n_j d\Sigma, \quad (9)$$

где $s_i(\xi)$ — смещение на поверхности разрыва Σ , n_j — компоненты единичного вектора нормали к поверхности Σ .

Учитывая, что напряжения могут быть выражены через деформации в соответствии с законом Гука, формула Вольтерра для случая однородной и изотропной среды может быть записана в виде:

$$u_k(\mathbf{x}) = \int_{\Sigma} \left[\mu(s_p n_q + s_q n_p) + \lambda s_k n_k \delta_{pq} \right] \frac{\partial g_k^p(\mathbf{x}, \xi)}{\partial \xi_q} d\Sigma = \int_{\Sigma} m_{pq} \frac{\partial g_k^p(\mathbf{x}, \xi)}{\partial \xi_q} d\Sigma, \quad (10)$$

где $m_{pq} = \mu(s_p n_q + s_q n_p) + \lambda s_k n_k \delta_{pq}$ — тензор плотности сейсмического момента [11], который отражает механику очага землетрясения.

Таким образом, в случае точечного источника, решение поставленной задачи может быть найдено в следующем виде:

$$u_k(\mathbf{x}) = m_{pq} \frac{\partial g_k^p(\mathbf{x}, \xi)}{\partial \xi_q}. \quad (11)$$

Формула (11) будет использована в дальнейшем как основная при моделировании.

Поскольку связь между компонентами тензора деформации ε_{ij} и потенциальной энергией упругих деформаций E квадратична, то повышающий коэффициент, позволяющий рассчитать напряженно-деформированное состояние земной коры при подготовке землетрясения, будем полагать равным $\eta^{-0,5}$. Удобный, с точки зрения вычислений, вариант оценки этого коэффициента был дан И. П. Добровольским [15]:

$$\eta = 10^{0,26M_W - 3,93}, \quad (12)$$

где M_W — моментная магнитуда землетрясения.

Результаты моделирования

Исходные данные. Для моделирования из каталога механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» [14] была отобрана

информация обо всех землетрясениях, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 г. по 2020 г. В частности использовались данные о дате и времени землетрясения, координатах эпицентра, глубине гипоцентра, магнитуде землетрясения, тензоре плотности сейсмического момента, скалярном сейсмическом моменте. Координаты эпицентров землетрясений находились в диапазоне широт от 49° с. ш. до 60° с. ш. и диапазоне долгот от 149° в. д. до 170° в. д. Всего выборка содержала $N = 877$ землетрясений.

Результаты наблюдений показывают, что ориентация акустического излучения зависит от азимутального направления на эпицентры землетрясений [7]. Поэтому все рассматриваемые землетрясения были разделены на три кластера методом K-средних по пространственному расположению их эпицентров (рис. 4а).

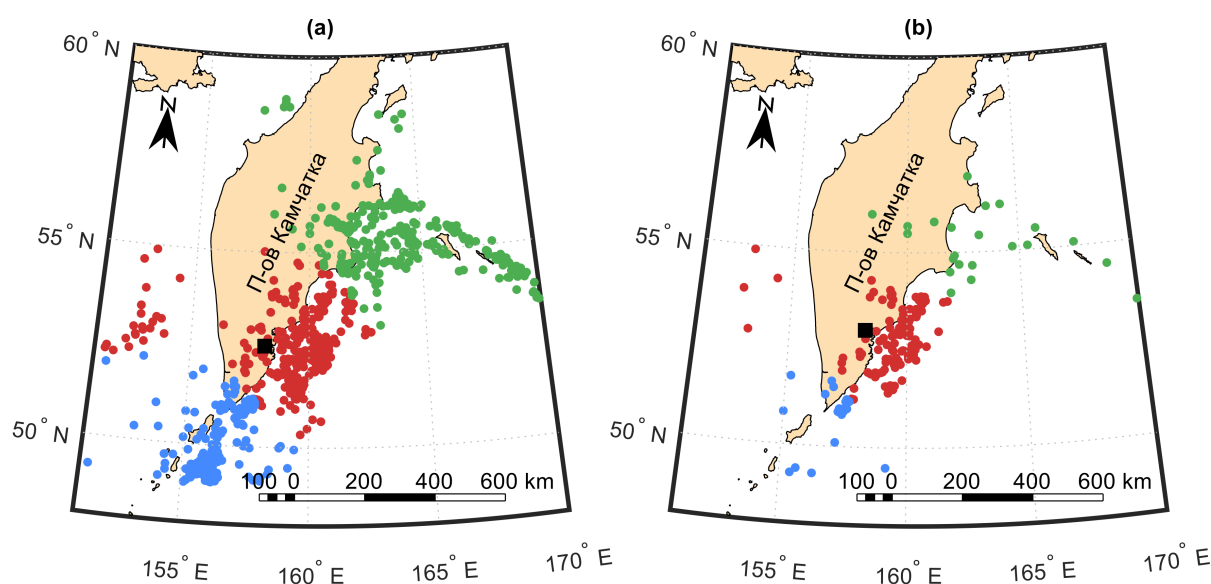


Рис. 4. Все $N = 877$ землетрясений, разделенные на кластеры по пространственному расположению их эпицентров: ● — кластер № 1, ● — кластер № 2, ● — кластер № 3 (а). Землетрясения, которые по результатам моделирования могли вызвать повышенные деформации в пункте наблюдения «Микижа» — ■ (б).

[Figure 4. All $N = 877$ earthquakes divided into clusters with respect to spatial locations of their epicenters: ● — cluster № 1, ● — cluster № 2, ● — cluster № 3.

Earthquakes which, according to modeling results, could cause deformation intensification at Mikizha observation site — ■ (b).]

Моделирования направления осей главных напряжений. Для каждого землетрясения из выборки было произведено моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры, возникающее при его подготовке. Рассчитаны деформации

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{\max}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\max} = \max\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|\}$ — максимальное касательное напряжение, а $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные значения тензора напряжений.

В результате были отобраны только те землетрясения, которые вызывают повышенные предсейсмические деформационные возмущения в пункте наблюдений «Микижа» (рис. 4b). Всего таких землетрясений было 169, большая часть из них принадлежат кластеру № 2. Далее для каждого землетрясения в точке, соответствующей пункту наблюдений, вычислены собственные векторы тензора напряжений, определяющие направления главных осей. Ось максимального сжатия сонаправлена с главной осью тензора напряжений, соответствующей максимальному из значений $|\sigma_1|, |\sigma_2|$. Гистограммы распределения направления этой оси представлены на рис. 5. Цвет гистограммы соответствует кластеру землетрясений. Серым на гистограммах обозначена область ориентации оси максимального сжатия в пункте наблюдений «Микижа» по результатам анализа аномалий направленности геоакустической эмиссии.

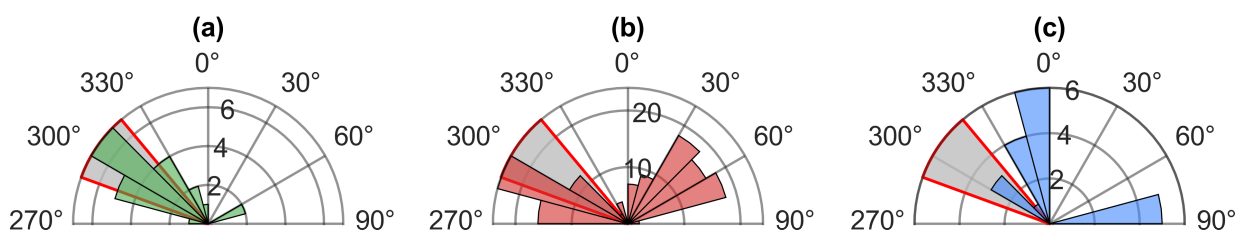




Рис. 5. Гистограммы распределения направлений оси максимального сжатия в пункте наблюдений «Микижа» при подготовке землетрясений из кластеров № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c) по результатам моделирования,  — область ориентации оси максимального сжатия по результатам анализа аномалий направленности геоакустической эмиссии.

[Figure 5. Distribution histograms of main stress axis direction angles at Mikizha observation site during preparation of the earthquakes from the clusters № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c) according to the modeling results,  — orientation region of the compression axis according to the analysis results of geoacoustic emission directivity anomalies.]

Как видно из рис. 5, результаты моделирования осей главных напряжений при подготовке землетрясений из кластеров № 1 и № 2 наиболее согласуются с экспериментальными оценками. Модальный интервал гистограммы для землетрясений из кластера № 1 имеет границы от 300° до 315° и полностью покрывается интервалом экспериментальной оценки направления оси максимального сжатия (рис. 5a). Границы модального интервала для землетрясений из кластера № 2 лишь частично покрываются этим интервалом. Кроме этого присутствуют локальные максимумы значений гистограммы распределения в области от 30° до 75° , которые перпендикулярны направлению оси максимального сжатия, полученному в результате экспериментальной оценки (рис. 5b). Направления оси, полученные в результате моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры при подготовке

землетрясений из кластера № 3, плохо согласуются с экспериментальными оценками (рис. 5с). Это может быть связано с тем, что при оценке оси максимального сжатия по аномалиям направленности геоакустической эмиссии, землетрясения из этого региона не рассматривались [8].

Заключение

Произведено моделирование направления осей главных напряжений горных пород при подготовке землетрясений для подтверждения гипотезы возникновения аномалий направленности геоакустической эмиссии. Эта гипотеза заключается в том, что влияние очага готовящегося землетрясения приводит к образованию постоянного направления осей главных напряжений в точке наблюдений.

В работе использована модель, разработанная ранее в рамках линейной теории упругости [16]. Земля рассмотрена в виде однородного изотропного упругого полупространства, очаг готовящегося землетрясения — в виде комбинации двойных пар сил. В модели также учтена потенциальная энергия упругих деформаций, накопленная в процессе подготовки землетрясения.

В рамках этой модели рассчитаны ориентации осей главных напряжений в пункте наблюдений «Микижа». Используются данные из каталога механики очагов землетрясений «The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog» о сейсмических событиях, произошедших вблизи полуострова Камчатка с 1976 по 2020 годы. Все рассматриваемые землетрясения были разделены на три группы по пространственному расположению их эпицентров.

Показано, что гистограммы распределения направлений осей главных напряжений согласуются с результатами экспериментальных оценок для двух групп землетрясений. Модальные интервалы и локальные максимумы гистограмм распределения попадают в диапазоны оценок ориентации осей максимального сжатия от 290° до 320° и от 20° до 50° соответственно.

Дальнейшее направление работы связано с более детальным анализом результатов моделирования и сопоставлении их с данными наблюдений. Необходимо применение статистических критериев для сравнения распределений угловых наблюдений, а также использование точечных и интервальных оценок их параметров.


Список литературы

1. Marapulets Y., Solodchuk A., Lukovenkova O., Mishchenko M., Shcherbina A. Sound Range AE as a Tool for Diagnostics of Large Technical and Natural Objects // *Sensors*, 2023. vol. 23, no. 3:1269, pp. 1–14.
2. Лавров А. В., Шкуратник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акустический журнал*, 2005. Т. 51, С. 6–18.
3. Гик Л. Д. Нелинейность гранулированных и трещиноватых горных пород в условиях малых деформаций // *Физическая мезомеханика*, 2005. Т. 8, № 1, С. 81–89.
4. Моргунов В. А., Любошевский М. Н., Фабрициус В. З., Фабрициус З. Э. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения // *Вулканология и сейсмология*, 1991. № 4, С. 104–106.


5. Gregori G. P., Poscolieri, M., Paparo G., De Simone S., Rafanelli C., Ventrice G. "Storms of crustal stress" and AE earthquake precursors // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. vol. 10, no. 2, pp. 319–337.
6. Марापудец Ю. В., Шевцов В. М., Ларионов И. А., Мищенко М. А., Щербина А. О., Солодчук А. А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // *Тихоокеанская геология*, 2012. Т. 31, № 6, С. 59–67.
7. Марापудец Ю. В., Щербина А. О. Оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород с использованием точечной приемной системы на основе комбинированного приемника // *Акустический журнал*, 2018. Т. 64, № 6, С. 718–726.
8. Марापудец Ю. В. *Высокочастотный акустоземиссионный эффект при деформировании приповерхностных осадочных пород в сейсмоактивном регионе*, дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Институт космофизических исследований ДВО РАН, 2015. 210 с.
9. Виноградов С. Д. Условия на разрыве и спектры излучаемых им волн // *Известия АН СССР. Физика Земли*, 1976. Т. 7, С. 20–26.
10. Шамина О. Г. Понятовская В. И. *Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред*. М.: ИФЗ РАН, 1993. 179 с.
11. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1*. М.: Мир, 1983. 519 с.
12. Лурье А. И. *Теория упругости*. М.: Наука, 1970. 940 с.
13. Segall P. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton: Princeton University Press, 2010. 456 pp.
14. *The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog* <https://www.globalcmt.org/>.
15. Добровольский И. П. *Математическая теория прогноза и подготовки тектонического землетрясения*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
16. Gapeev M., Marapulets Y. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula // *Applied Sciences*, 2022. vol. 13, no. 1:290, pp. 1–14.

Информация об авторах



Гапеев Максим Игоревич✉ – младший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-5798-7166.




Солодчук Александра Андреевна✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, ученый секретарь, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-6761-8978.

References


- [1] Marapulets Y., Solodchuk A., Lukovenkova O., Mishchenko M., Shcherbina A. Sound Range AE as a Tool for Diagnostics of Large Technical and Natural Objects, *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3:1269, pp. 1–14. DOI: 10.3390/s23031269.
- [2] Lavrov A. V., Shkuratnik V. L. Deformation- and fracture-induced acoustic emission in rocks (review), *Acoustical Physics*, 2005, vol. 51, pp. 6-18 (In Russian).
- [3] Gik L. D. Nonlinearity of granular and cracked rocks in the conditions of small strains, *Physical Mesomechanics*, vol. 8, no. 1, pp. 81–89 (In Russian).
- [4] Morgunov V. A., Lyubashevsky M. N., Fabricius V. Z., Fabricius Z. E. Geoacoustic harbinger of the Spitak earthquake [Geoakusticheskiy predvestnik Spitakskogo zemletryaseniya], *Journal of Volcanology and Seismology*, 1991. No. 4, pp. 104-106 (In Russian).
- [5] Gregori G. P., Poscolieri M., Paparo G., De Simone S., Rafanelli C., Ventrice G. “Storms of crustal stress” and AE earthquake precursors, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. vol. 10, no. 2, pp. 319–337. DOI: 10.5194/nhess-10-319-2010.
- [6] Marapulets Y. V., Shevtsovs B. M., Larionov I. A., Mishchenko M. A., Shcherbina A. O, Solodchuk A. A. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation, *Russ. J. of Pac. Geol*, 2012, no. 6, 457–464. DOI: 10.1134/S1819714012060048.
- [7] Marapulets Y. V., Shcherbina A. O. Assessing the orientation of the axis of maximum compression of rocks with a combined point receiver system, *Acoustical Physics*, vol. 64, no. 6, pp. 742–749.
- [8] Vinogradov S. D. Conditions at the rupture and spectra of the waves emitted by it, *Izvestiya [Usloviya na razryve i spektry izluchaemykh im voln]*, *Physics of the Solid Earth*, 1976, vol. 7, pp. 20–26.
- [9] Shamina O. G. Poniatovskaya V. I. Model studies of inhomogeneous and fractured media [Model'nye issledovaniya neodnorodnykh i treshchinovatykh sred], Moscow, IFZ RAS, 1993, 179 p. (In Russian).
- [10] Marapulets Yu. V. High-frequency acousto-emission effect during deformation of near-surface sedimentary rocks in a seismically active region [Vysokochastotnyy akustoemissionnyy effekt pri deformirovaniy pri poverkhnostnykh osadochnykh porod v seysmoaktivnom regione], Diss. ... Doc. Sci. (Phys.-Math.). Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 2015, 210 p. (In Russian).
- [11] Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*, 2nd ed., Cambridge, University Science Books, 2002, 704 p.
- [12] Lurie A. I. *Theory of elasticity [Teoriya uprugosti]*, Moscow, Nauka, 1970, 940 p. (In Russian).
- [13] Segall P. *Earthquake and volcano deformation*, Princeton, Princeton University Press, 2010, 456 p.
- [14] The Global Centroid-Moment-Tensor Catalog <https://www.globalcmt.org/>.
- [15] Dobrovolskiy I. P. Mathematical theory of prediction and preparation of a tectonic earthquake [Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya], Moscow, FIZMATLIT, 2009, 240 p. (In Russian).
- [16] Gapeev M., Marapulets Y. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula, *Applied Sciences*, 2022, vol. 13, no. 1:290, pp. 1–14. DOI: 10.3390/app13010290.

Information about the authors



Gapeev Maksim Igorevich ✉ – Junior Researcher, Lab. of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5798-7166.



Solodchuk Aleksandra Andreevna ✉ – Ph.D. (Phys. & Math.), Senior Researcher, Lab. of Acoustic Research, Scientific Secretary, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-6761-8978.