



Моделирование влияния неоднородных включений в среде на формирование зон геоакустической эмиссии

М. И. Гапеев, А. А. Солодчук*

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

Аннотация. Геоакустическая эмиссия — это процесс генерации упругих волн горными породами в результате динамической перестройки их структуры. Результаты наблюдений показывают, что на динамику геоакустической эмиссии влияют механические процессы, протекающие в очаге готовящегося землетрясения. Ранее с целью обоснования связи между вариациями геоакустической эмиссии и процессом подготовки землетрясений было проведено моделирование зон геоакустической эмиссии — областей поверхности земной коры с деформациями порядка 10^{-8} – 10^{-5} . Результаты проведенного ранее моделирования показывают, что уровень расчетных деформаций в пунктах наблюдений превышает приливные, но на порядок отличается от зарегистрированных. Это может быть связано с тем, что земная кора рассматривалась в виде однородной среды. В действительности земная кора состоит из слоев горных пород, часть из которых находятся в закритическом состоянии и проявляют пластические и квазипластические свойства. Настоящая статья посвящена моделированию влияния неоднородностей земной коры на пространственное распределение зон геоакустической эмиссии. Неоднородности описываются системой простых сил, распределенной по поверхности сферического включения. Интенсивность действия сил полагается постоянной. Получены решения краевой задачи линейной теории упругости в виде свертки функций Грина для однородного изотропного упругого полупространства. Проведены вычислительные эксперименты, и построены линии уровней компонентов поля вектора смещений поверхности земной коры. Показано, что сферические включения оказывают влияние на поле вектора смещений поверхности земной коры. Характер влияния зависит от количества неоднородных включений и их расположения относительно очага готовящегося землетрясения.

Ключевые слова: зоны геоакустической эмиссии, неоднородное включение, предсейсмические деформации, математическое моделирование.

Получение: 01.11.2024; Исправление: 20.11.2024; Принятие: 25.11.2024; Публикация онлайн: 27.11.2024

Для цитирования. Гапеев М. И., Солодчук А. А. Моделирование влияния неоднородных включений в среде на формирование зон геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 9-23. EDN: UULYOS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-9-23>.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 22-11-0064 «Моделирование динамических процессов в геосферах с учетом наследственности» <https://rscf.ru/project/22-11-00064/>).

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)





Modeling of the Impact of Environment Inhomogeneous Inclusions on the Formation of Geoacoustic Emission Zones

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

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

Abstract. Geoacoustic emission is the process of elastic wave generation by rocks as the result of dynamic reconstruction of their structure. Observation results show that mechanic processes, occurring in the source of a preparing earthquake, affect the geoacoustic emission dynamics. Modeling of geoacoustic emission zones, the regions of the earth crust surface with deformations of the order $10^{-8} - 10^{-5}$, has been earlier carried out to prove the relation between geoacoustic emission variations and the process of earthquake preparation. Results of the modeling, which was performed earlier, show that the level of calculated deformations at observation sites exceeds the tidal ones but differs by one order from the recorded deformations. This may be associated with the fact that the earth crust was considered as a homogeneous environment. In reality, the earth crust consists of rock layers, some part of which has supercritical state and manifests plastic and quasi-plastic properties. The present paper is devoted to the modeling of the earth crust inhomogeneities impact on spatial distribution of geoacoustic emission zones. Inhomogeneities are described by simple force system distributed over spherical inclusion surface. Intensity of the force action was assumed to be constant. Solutions for the boundary problem of elasticity linear theory were obtained in the form of Green's functions convolution for homogeneous isotropic elastic half-space. Computational experiments were carried out, and lines of the field component levels of the displacement vectors of the earth crust surface were constructed. It was shown that spherical inclusions affect displacement vector field of the earth crust surface. The impact character depends on the number of inhomogeneous inclusions and their locations relative to the source of a preparing earthquake.

Key words: geoacoustic emission zones, inhomogeneous inclusions, pre-seismic deformations, mathematical modeling.

Received: 01.11.2024; Revised: 20.11.2024; Accepted: 25.11.2024; First online: 27.11.2024

For citation. Gapeev M.I., Solodchuk A.A. Modeling of the impact of environment inhomogeneous inclusions on the formation of geoacoustic emission zones. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 9-23. EDN: UULYOS. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-9-23>.

Funding. The work was funded by Russian Science Foundation [grant number 22-11-00064 «Modeling dynamic processes in geospheres taking into account hereditary»]. <https://rscf.ru/project/22-11-00064/>.

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

Геоакустическая эмиссия — это процесс генерации упругих волн горными породами в результате динамической перестройки их структуры. На ее динамику влияют различные механические процессы, протекающие в горных породах, в том числе и механические процессы в очаге готовящегося землетрясения. В ряде исследований установлено [1–5], что предсейсмический отклик наблюдается в сигналах геоакустической эмиссии, зарегистрированной на расстоянии первых сотен километров от источника землетрясения. С целью обоснования связи между вариациями геоакустической эмиссии и характером деформационного процесса ранее было проведено моделирование зон геоакустической эмиссии в упругом однородном приближении среды [6, 7]. Зона геоакустической эмиссии — это область поверхности земной коры с деформациями порядка от 10^{-8} до 10^{-5} , вызванными процессами в очаге готовящегося землетрясения. Такие значения деформаций выше приливных, но ниже порога прочности горных пород.

Результаты ранее проведенного моделирования показывают, что уровень расчетных деформаций в пунктах наблюдений превышает приливные, но на порядок ниже зарегистрированных [6]. Это может быть результатом приближения земной коры в виде однородного пространства. В действительности земная кора состоит из слоев горных пород, часть из которых находятся в закритическом состоянии и проявляют пластические и квазипластические свойства [8, 9]. Поэтому цель настоящей работы заключается в моделировании влияния неоднородных включений на пространственное распределение зон геоакустической эмиссии.

Модель очага землетрясения. Согласно концепции, впервые предложенной Б. В. Костровым, тектоническое землетрясение представляет собой разрыв сплошности материала Земли, который возникает под действием упругих сдвиговых напряжений, накопленных в процессе тектонической деформации. Такой разрыв является разрывом скольжения.

В момент землетрясения происходит полное или частичное снятие накопленных напряжений в его очаге. Деформации, возникающие при подготовке землетрясения, обусловлены приращением потенциальной энергии 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

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

Очаг землетрясения можно описать через некоторую систему сил, распределенную по поверхности разрыва. Для описания произвольно ориентированного разрыва скольжения в изотропной среде используют систему, состоящую из девяти пар двойных сил [10, 11].

Математическая постановка задачи

Уравнения и граничные условия. Рассмотрим земную кору в виде упругого изотропного полупространства. Поведение такой среды можно описать при помощи системы, состоящей из уравнений равновесия, определяющих соотношений — обобщенного закона Гука, а также выражений, определяющих тензор малых деформаций ε_{ij} :

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} + X_i &= 0, \\ \sigma_{ij} &= \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}).\end{aligned}\tag{2}$$

где σ_{ij} — тензор напряжений, X_i — вектор массовых сил, μ, λ — коэффициенты Ламе, u_i — вектор смещений. Уравнения записаны в тензорной форме, 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:

$$\sigma_{31}|_{x_3=0} = \sigma_{32}|_{x_3=0} = \sigma_{33}|_{x_3=0} = 0.\tag{3}$$

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

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_{ij} = 0,\tag{4}$$

где $r = \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2}$ — расстояние от точки x_i до начала координат.

Компоненты вектора X , соответствующие системе из комбинации двойных пар сил, выражаются следующим образом:

$$X_i = p_{ij} \frac{\partial \delta(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_j},\tag{5}$$

где p_{ij} — интенсивность соответствующей пары сил; $\delta(\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi})$ — дельта-функция; $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ — точка приложения системы сил.

Аналитическое решение. Для задачи (2) с граничными условиями (3) и (4) известны решения в терминах вектора смещений u_i через функции Грина. Для единичной силы, приложенной к точке $\boldsymbol{\xi}$ упругого полупространства и направленной вдоль оси x_3 , функция Грина $g^3(\mathbf{x})$ имеет вид:

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

где ν — коэффициент Пуассона, а r_1 и r_2 :

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

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

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

Ввиду симметричности задачи, функция Грина $g^2(x)$, соответствующая действию единичной силы вдоль оси x_2 , может быть получена из функции $g^1(x)$ заменой осей x_1 и x_2 . Функции Грина, отвечающие действию двойных сил, могут быть получены дифференцированием функций $g^i(x)$ по пространственным координатам, то есть в виде $\partial g^i(x)/\partial x_j$ [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]:

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

где $s_i(\xi)$ — смещение на поверхности разрыва Σ , n_j — единичный вектор 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:

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

где $m_{pq} = \mu(s_p n_q + s_q n_p) + \lambda s_k n_k \delta_{pq}$ — тензор плотности сейсмического момента [10], который отражает механику очага землетрясения.

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

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

где S_{Σ} — площадь поверхности силового воздействия Σ .

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 [14]:

$$\eta = 10^{0.26M_W - 3.93}, \quad (12)$$

где M_W — моментная магнитуда землетрясения.

Неоднородное включение в земной коре. Область земной коры, обладающую неупругими свойствами можно описать через систему сил, распределенную по ее границе. Подобное силовое воздействие характерно для слоев горных пород, находящихся в закритическом состоянии и проявляющих пластические свойства.

Будем полагать, что неоднородное включение Ω имеет сферическую форму радиуса R с границей Γ (рис. 1), которая задана функцией $F(x_1, x_2, x_3) = 0$:

$$(x_1 - c_1)^2 + (x_2 - c_2)^2 + (x_3 - c_3)^2 = R^2, \quad (13)$$

где (c_1, c_2, c_3) — центр сферического включения.

Пусть на поверхности Γ в каждой точке заданы простые силы интенсивности P , действующие по направлению внешней нормали ζ . Решение для поля перемещений u может быть найдено в виде поверхностного интеграла от функций Грина:

$$u_i(x) = P \oint_{\Gamma} g_i^j(x, \xi) \zeta_j(\xi) d\Gamma(\xi). \quad (14)$$

Преобразуя интеграл (14) при помощи формулы Остроградского-Гаусса [15], получим

$$u_i(x) = P \oint_{\Gamma} g_i^j(x, \xi) \zeta_j(\xi) d\Gamma(\xi) = P \int_{\Omega} \frac{\partial g_i^j(x, \xi)}{\partial \xi_j} dV(\xi). \quad (15)$$

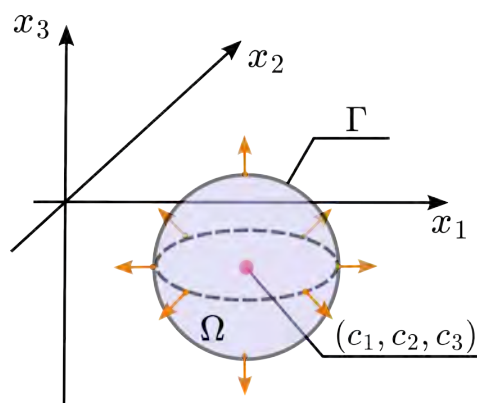


Рис. 1. Сферическое включение Ω , ограниченное поверхностью Γ с центром в точке (c_1, c_2, c_3) , на которой заданы простые силы интенсивности P ($\rightarrow$) по направлению внешней нормали.

[Figure 1. Spherical inclusion Ω , limited by the surface Γ with the center at the point (c_1, c_2, c_3) , on which simple forces of intensity P ($\rightarrow$) are specified in the direction of the outer normal.]

Для упрощения интегрирования перейдем в сферическую систему координат (r, θ, φ) :

$$\begin{cases} \xi_1(r, \theta, \varphi) = r \sin \theta \cos \varphi, \\ \xi_2(r, \theta, \varphi) = r \sin \theta \sin \varphi, \\ \xi_3(r, \theta, \varphi) = r \cos \theta. \end{cases} \quad (16)$$

Производя замену переменных интегрирования (16) в объемном интеграле (15), получим

$$u_i(x) = P \int_{\Omega} \frac{\partial g_i^j(x, \xi)}{\partial \xi_j} dV(\xi) = P \int_0^R dr \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} g_{i,j}^j(x, r, \theta, \varphi) \mathcal{J}(r, \theta, \varphi) d\varphi, \quad (17)$$

где $\mathcal{J}(r, \theta, \varphi) = r^2 \sin \theta$ — якобиан.

Результаты моделирования

Вычислительный эксперимент №1. Вычисления во всех экспериментах производятся на поверхности $x_3 = 0$. Параметры гипотетического землетрясения следующие: координаты $\xi_1 = 12 \cdot 10^3$ м, $\xi_2 = 0$ м, $\xi_3 = -15 \cdot 10^3$ м, тензор плотности сейсмического момента

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} -1,450 & -0,675 & 4,550 \\ -0,675 & -0,281 & 2,120 \\ 4,550 & 2,120 & 1,730 \end{bmatrix} \cdot 10^{15} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (18)$$

Параметры неоднородного включения: координаты центра $c_1 = 0$ м, $c_2 = 0$ м, $c_3 = -5 \cdot 10^3$ м, радиус $R = 4 \cdot 10^3$ м, величина силы $P = 2 \cdot 10^6$ Н. Результаты моделирования в виде компонентов вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ представлены на рис. 2 – 4.

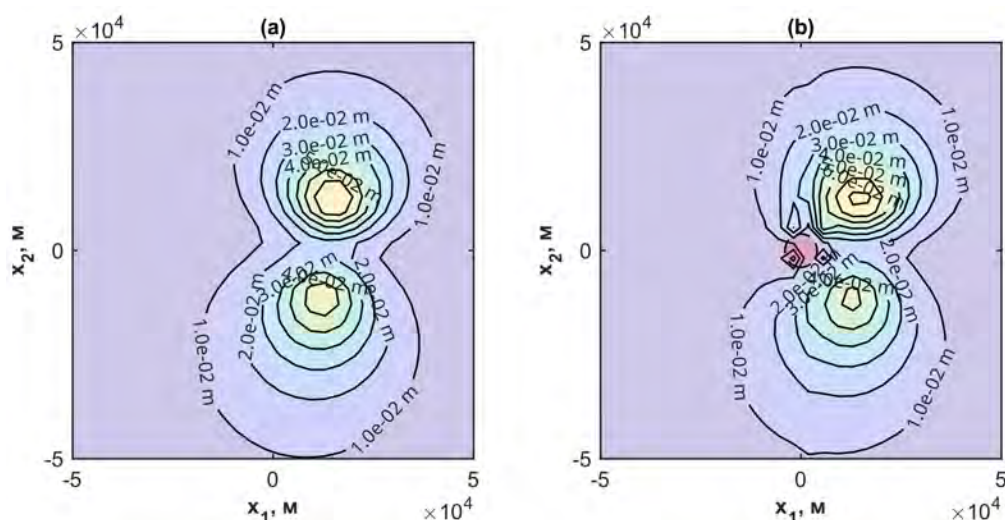


Рис. 2. Результат вычислительного эксперимента №1. Компонент u_1 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (а) и при наличии сферической неоднородности (б); ● — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 2. Result of the computational experiment №1. Component u_1 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); ● — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

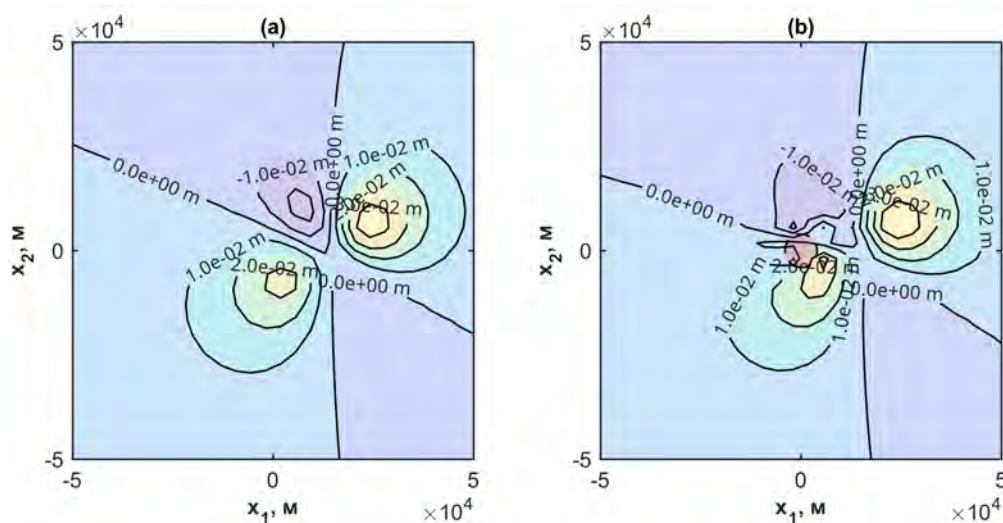


Рис. 3. Результат вычислительного эксперимента №1. Компонент u_2 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (а) и при наличии сферической неоднородности (б); ● — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 3. Result of the computational experiment №1. Component u_2 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); ● — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

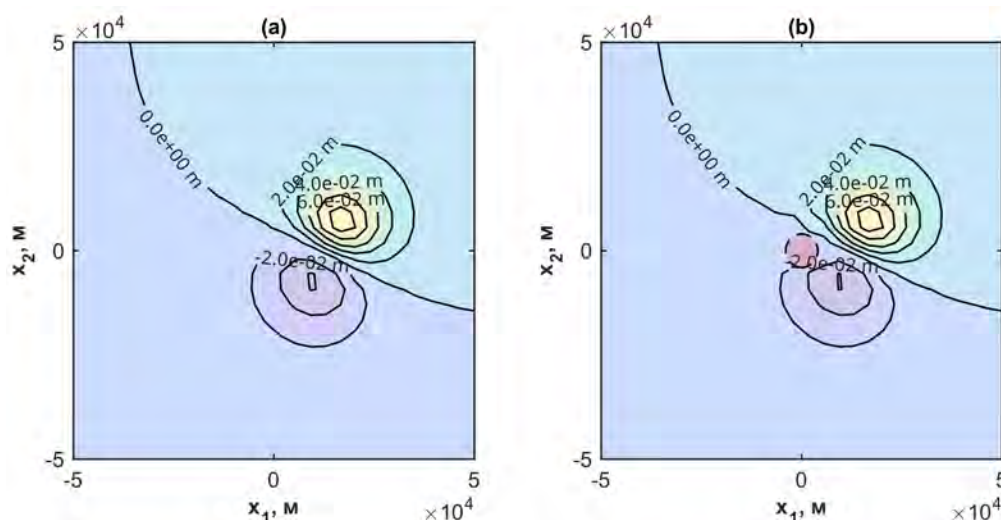


Рис. 4. Результат вычислительного эксперимента №1. Компонент u_3 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (а) и при наличии сферической неоднородности (b);  — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 4. Result of the computational experiment №1. Component u_3 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b);  — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

Вычислительный эксперимент №2. Параметры гипотетического землетрясения следующие: координаты $\xi_1 = 0$ м, $\xi_2 = 5 \cdot 10^3$ м, $\xi_3 = -30 \cdot 10^3$ м, тензор плотности сейсмического момента

$$m_{pq} = \begin{bmatrix} 0,060 & -0,560 & 0,300 \\ -0,560 & -1,500 & 1,240 \\ 0,300 & 1,240 & 1,440 \end{bmatrix} \cdot 10^{16} \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (19)$$

Параметры неоднородного включения: координаты центра $s_1 = 15 \cdot 10^3$ м, $s_2 = 0$ м, $s_3 = -8 \cdot 10^3$ м, радиус $R = 7 \cdot 10^3$ м, величина силы $P = 5 \cdot 10^6$ Н. Результаты моделирования в виде компонентов вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ представлены на рис. 5 – 7.

Вычислительный эксперимент №3. Все параметры эксперимента идентичны предыдущему. Добавлено второе неоднородное включение с центром в точке $s_1 = 0$ м, $s_2 = 0$ м, $s_3 = -5 \cdot 10^3$ м и величиной силы $P = 5 \cdot 10^6$ Н. Результаты моделирования в виде компонентов вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ представлены на рис. 8 – 10.

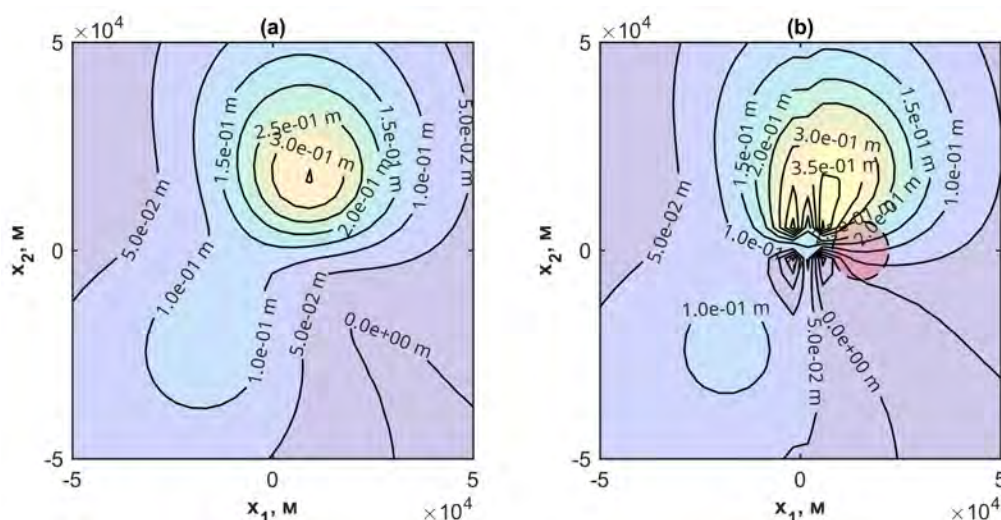


Рис. 5. Результат вычислительного эксперимента №2. Компонент u_1 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (а) и при наличии сферической неоднородности (б); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 5. Result of the computational experiment №2. Component u_1 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

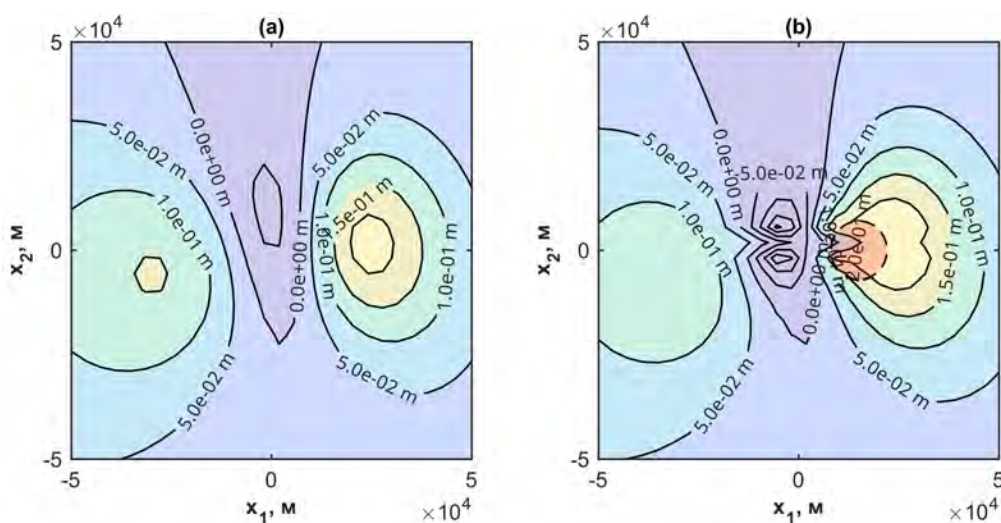


Рис. 6. Результат вычислительного эксперимента №2. Компонент u_2 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (а) и при наличии сферической неоднородности (б); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 6. Result of the computational experiment №2. Component u_2 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

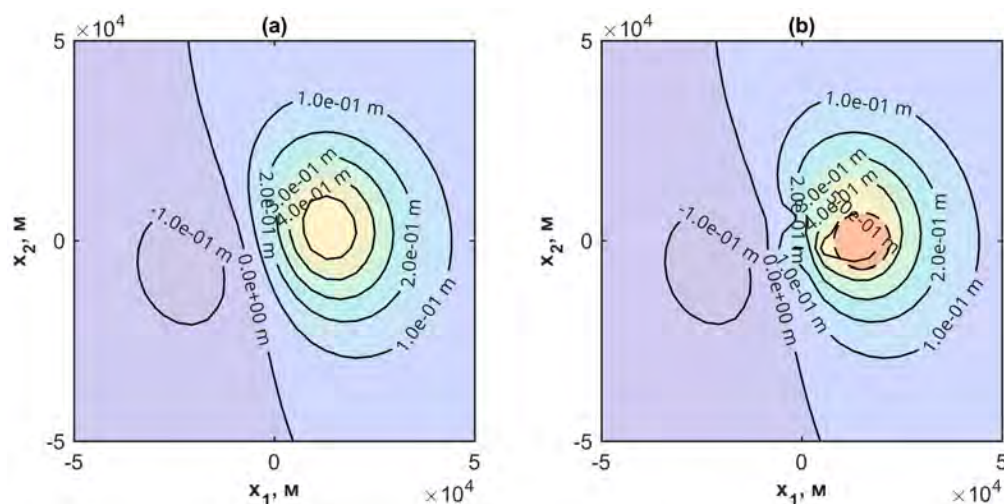


Рис. 7. Результат вычислительного эксперимента №2. Компонент u_3 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (a) и при наличии сферической неоднородности (b); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 7. Result of the computational experiment №2. Component u_3 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

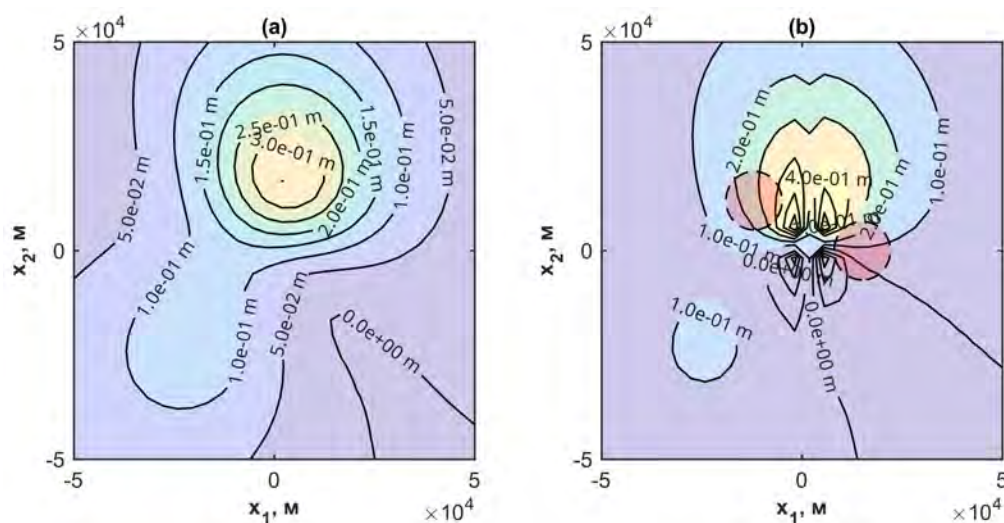


Рис. 8. Результат вычислительного эксперимента №3. Компонент u_1 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (a) и при наличии сферической неоднородности (b); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 8. Result of the computational experiment №3. Component u_1 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

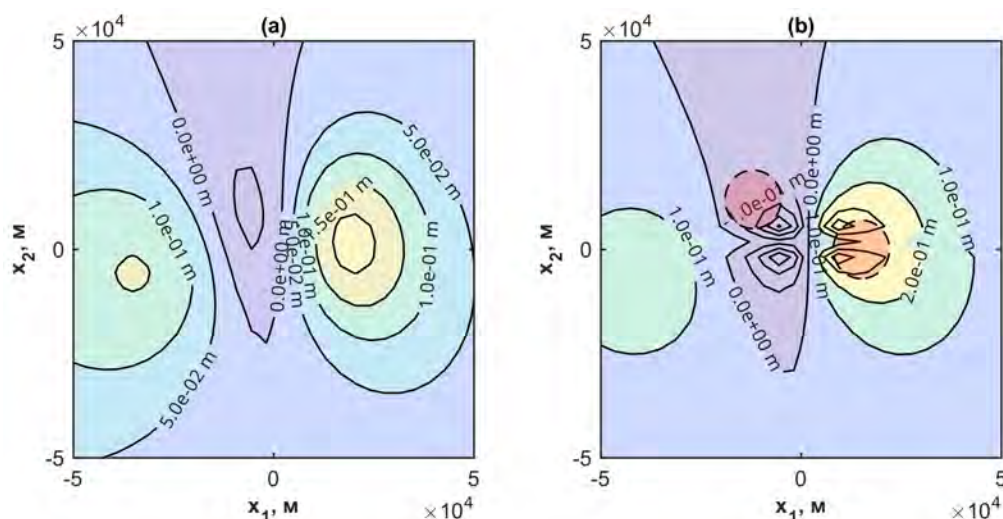


Рис. 9. Результат вычислительного эксперимента №3. Компонент u_2 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (a) и при наличии сферической неоднородности (b); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 9. Result of the computational experiment №3. Component u_2 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

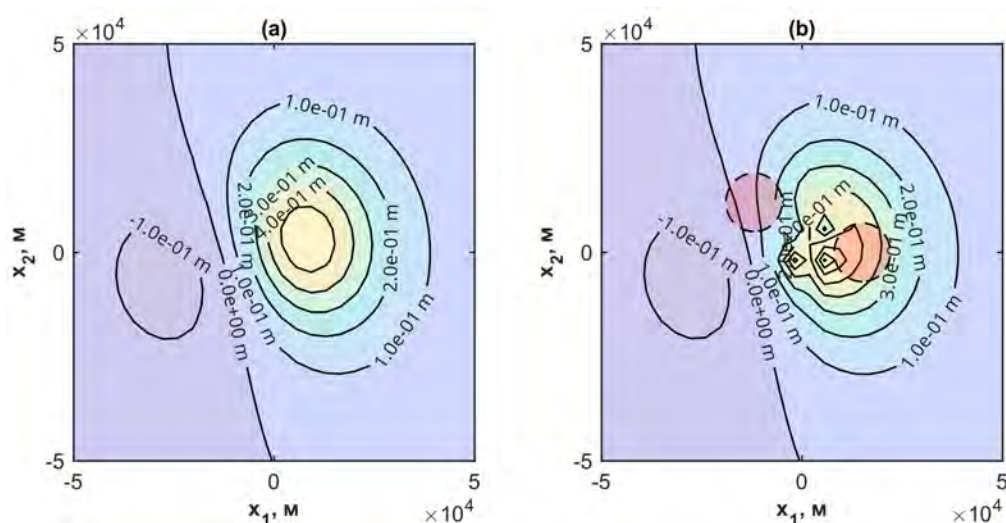


Рис. 10. Результат вычислительного эксперимента №3. Компонент u_3 вектора смещений на поверхности $x_3 = 0$ в случае однородной среды (a) и при наличии сферической неоднородности (b); $\bullet$ — проекция сферической неоднородности на поверхность $x_3 = 0$.

[Figure 10. Result of the computational experiment №3. Component u_3 of the shift vector on the surface $x_3 = 0$ in case of homogeneous environment (a) and with a spherical inhomogeneity (b); $\bullet$ — projection of the spherical inhomogeneity on the surface $x_3 = 0$.]

Обсуждение результатов. Как показывают результаты моделирования, наличие неоднородных включения в среде оказывает влияние на смещения поверхности земной коры. Наблюдается, например, «экранирование» части области поверхности земной коры (рис. 8b), которое выражается в уменьшении абсолютного значения компонентов вектора смещений. Это может быть одной из причиной несогласованности результатов наблюдений геоакустической эмиссии и результатов моделирования в случае однородной среды.

Заключение

Произведено моделирование влияния неоднородного строения земной коры на зоны геоакустической эмиссии. Неоднородности описываются системой сил, распределенной по поверхности сферического включения. Решения получены в виде свертки функций Грина для упругого полупространства. Показано, что сферические включения оказывают влияние на поле вектора смещений поверхности земной коры. Может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение абсолютного значения компонентов вектора смещений в зависимости от количества неоднородных включений и их расположения относительно очага готовящегося землетрясения.

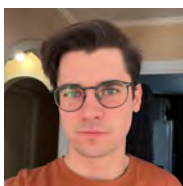
В настоящей работе величина P сосредоточенных сил, распределенных по поверхности неоднородного включения, полагалась постоянной. В реальности же будет наблюдаться зависимость от пространственных координат, т. е. $P = P(\xi)$. Построение такой модели может являться дальнейшим направлением развития работы.

Список литературы

1. Соболев Г. А., Любушин А. А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // *Физика Земли*, 2006. №9, С. 5–17.
2. Марапудец Ю. В., Шевцов Б. 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.
3. Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive approach to time-frequency analysis of AE signals of rocks // *Sensors*, 2022. vol. 22, no. 24, pp. 1–13, 9798.
4. 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.
5. Моргунов В. А., Любошевский М. Н., Фабрициус В. З., Фабрициус З. Э. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения // *Вулканология и сейсмология*, 1991. №4, С. 104–106.
6. 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, pp. 1–14, 290.
7. Пережогин А. С., Шевцов Б. М. Модели напряженно-деформированного состояния горных пород при подготовке землетрясений и их связь с геоакустическими наблюдениями // *Вычислительные технологии*, 2009. Т. 14, №3, С. 48–57.
8. Ребецкий Ю. Л., Лермонтова А. С. Учет закритического состояния геосреды и проблема дальнего действия влияния очагов землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*, 2016. №4, С. 115–123.
9. Ребецкий Ю. Л., Лермонтова А. С. О проблеме дальнего действия влияния очагов землетрясений // *Вулканология и сейсмология*, 2018. №5, С. 53–66.
10. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология. Теория и методы*, Т.1. М.: Мир, 1983. 519 с.

11. Sholz C. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019. 512 pp.
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. Добровольский И. П. *Математическая теория прогноза и подготовки тектонического землетрясения*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
15. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1984. 835 с.

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.

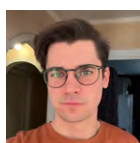


Солодчук Александра Андреевна✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, ученый секретарь, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0002-6761-8978.

References

- [1] Sobolev G. A., Lyubushin A. A. Microseismic impulses as earthquake precursors, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2006, vol. 42, no. 9, pp. 721-733. DOI: 10.1134/S1069351306090023.
- [2] Marapulets Y. V., et. al. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation, *Russ. J. of Pac. Geol.*, 2012, no. 6, 457-464. DOI: 10.1134/S1819714012060048.
- [3] Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive approach to time-frequency analysis of AE signals of rocks, *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 24:9798, pp. 1-13. DOI: 10.3390/s22249798.
- [4] Gregori G. P., et. al. "Storms of crustal stress" and AE earthquake precursors, *Natural Haz. and Earth Sys. Sci.*, 2010. vol. 10, no. 2, pp. 319-337. DOI: 10.5194/nhess-10-319-2010.
- [5] Morgunov V. A., Lyubashevsky M. N., Fabricius V. Z., Fabricius Z. E. Geoacoustic harbinger of the Spitak earthquake, *Jour. of Volcan. and Seism.*, 1991. No. 4, pp. 104-106 (In Russian)
- [6] 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, DOI: 10.3390/app13010290.
- [7] Perezhogin A. S., Shevtsov B. M. Models of an intense-deformed condition of rocks before earthquakes and their correlation with geo-acoustic emission, *Computational Technologies*, 2009, vol. 14, no. 3, pp. 48-57, (In Russian)
- [8] Rebetsky Yu. L., Lermontova A. S. Registration of supercritical conditions of geologic environment and challenges in earthquake source remote sensing, *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 2016, no. 4, pp. 115-123, (In Russian)
- [9] Rebetsky Yu. L., Lermontova A. S. On the long-range influence of earthquake rupture zones, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 341-352.
- [10] Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*, Cambridge, Univ. Sci. Books, 2002, 704 p.
- [11] Sholz C. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge, Cambr. Univ. Press, 2019, 512 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, Princ. Univ. Press, 2010, 456 p.
- [14] 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)
- [15] Korn G., Korn T. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*, N-Y, Dover Publications, 2013, 1152 p.

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.