УДК 51-73:550.3 Научная статья

Оценка областей повышенных деформаций, возникающих при подготовке камчатских землетрясений

М. И. Гапеев[1,2]

[1] Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, п. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

[2] Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

E-mail: owlptr@yandex.ru

Статья посвящена математическому моделированию областей повышенных деформаций земной коры, возникающих при подготовке камчатских землетрясений. Для этого произведено обобщение классической модели косейсмических деформаций земной коры, которое заключалось во введении повышающих коэффициентов, зависящих от эффективности снятия энергии упругих деформаций. На основании разработанной модели произвдено моделирование полей деформации, возникающих при подготовке двух камчатских землетрясений. Показано, что области повышенных деформаций распространяются на сотни километров от очагов готовящихся землетрясений как на поверхности земной коры, так и в ее толще.

Ключевые слова: математическое моделирование, деформация земной коры, очаг землетрясения, КПД землетрясения, предсейсмические аномалии

DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46

Поступила в редакцию: 02.12.2022 В окончательном варианте: 06.12.2022

Для цитирования. Гапеев М. И. Оценка областей повышенных деформаций, возникающих при подготовке камчатских землетрясений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41. № 4. С. 32-46. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Гапеев М. И., 2022

Введение

Принято считать, что при подготовке сейсмических событий ведущую роль играют механические процессы. Они обуславливают появление повышенных напряжений, приводящих к деформациям земной коры вокруг очага землетрясения. Эти изменения напряженно-деформированного состояния пород прямо или опосредовано приводят к возникновению аномалий в различных геофизических полях:

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания АААА-А21-121011290003-0

акустической эмиссии [1], электромагнитном излучении [2], геомагнитном поле [3], ионосфере [4]. Такие аномалии классифицируются как предвестники землетрясений и наблюдаются во многих сейсмоактивных регионах планеты, в том числе и на Камчатке [5, 6, 7, 8, 9]. Исследованию процессов, протекающих в геосфере посвящен обширный перечень работ. Основные концепции геодинамики подробно описали Д. Туркот и Дж. Шуберт [10]. Они привели математическое описание обширного перечня физических процессов твердой Земли, а также дополнили его вычислительными аспектами. Актуальные концепции механики очага землетрясения описал К. Шольц [11]. Теория распространения сейсмических волн, возбуждаемых землетрясениями, и методы обработки сейсмологических данных рассмотрены в работе К. Аки и П. Ричардса [12]. Компактные аналитические решения для расчета напряженно-деформированного состояния земной коры в случае однородного изотропного упругого полупространства вывел в своих работах Ю. Окада [13, 14]. Им были рассмотрены решения как для точечного источник напряжений, так и для равномерно распределенного по прямоугольной площадке. Дальнейшие работы взяли за основу труды Ю. Окада и обобщили предложенную им модель на более сложные случаи упругой среды. Например, на случай однородной упругой сферы [15] и слоистой упругой сферы [16]. И. П. Добровольский [17] привел математическое описание процесса подготовки землетрясения. Он в своих работах ввел понятие зоны проявления предвестников и показал, что ее размер будет обусловлен энергией готовящегося землетрясения. Также И. П. Добровольский предложил ограничить размеры этой зоны границами, за которыми аномалии в деформациях не будут превышать фоновый деформационный процесс с уровнем относительных деформаций порядка 10^{-8}. А. С. Алексеев с соавторами [18] связал аномалии в геофизических полях, возникающие в сейсмоактивных регионах, с образованием областей нелинейного разуплотнения геосреды – зон дилатансии.

Так же ранее проводилось моделирование полей напряжений и деформаций, возникающих вокруг очагов камчатских землетрясений. При этом использовалсиь такие модели очага, как: точечный источник в виде единичной силы [19] и двойной силы [20, 21], распределенный источника в виде прямоугольной площадки [22]. Проведено сравнительное моделирование полей деформаций с использованием этих моделей очага [23]. Показано, что предпочтительно использовать модель распределенного источника в виде прямоугольной площадки, как более точно описывающую силовое воздействие, возникающее в очаге землетрясения.

Используя предложенный А. С. Алексеевым и его соавторами подход, В. А. Салтыков и Ю. А. Кугаенко произвели моделирование зон дилатансии, возникающих при подготовке камчатских землетрясений [22]. Отличительная особенность их работы с точки зрения моделирования заключалась в учете полной накопленной энергии упругих деформаций при подготовке землетрясений. Для этого они использовали типовые значения КПД землетрясений.

Однако общая оценка областей повышенных деформаций земной коры при подготовке камчатских землетрясений с учетом полной энергии упругих деформаций ранее не проводилась. В настоящей работе предлагается подход к оценке таких об-

ластей. Известная модель косейсмических деформаций земной коры [14] обобщена для расчета поля напряжений при подготовке камчатских землетрясений.

Математическая постановка задачи

Известно, что очаг тектонического землетрясения возникает в результате разрядки напряжений, накопленных упругой средой в процессе тектонической деформации. В результате этой разрядки возникает область разрыва сплошности среды, накопленная упругая энергия деформации переходит в неупругую. Подробное описание дислокационной теории очага можно найти в работе К. Аки и П. Ричардса [12]. Согласно этой теории, очаг землетрясения можно описать через подвижку по поверхности разрыва. Примечательно, что подвижка по разрыву возбуждает те же сейсмические волны, что и распределенная на разрыве некоторая система сил с нулевым суммарным моментом. В общем виде распределение сил может иметь различный вид, но в случае изотропной среды его всегда можно выбрать как поверхностное распределение двойных пар сил. Ограничимся рассмотрением плоской площадки разрыва. Такая модель очага землетрясения схематически представлена на рис. 1.

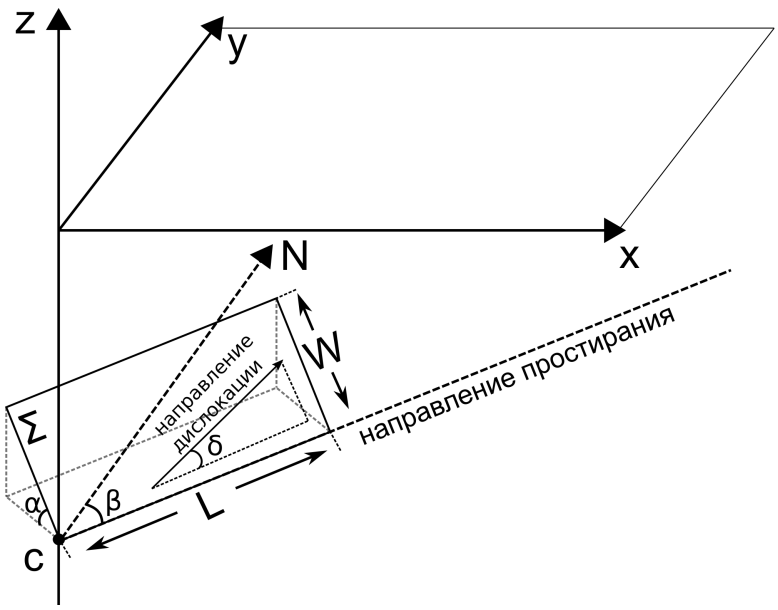


Рис. 1. Схематическое описание модели очага со следующими параметрами: α – угол падения, β – угол простирания, δ – угол направления подвижки, C– глубина гипоцентра, L – длина площадки, W – ее ширина, N – направление на север (ось сонаправлена с OY), Σ – плоскость разрыва
[Figure 1. Schematic description of the earthquake source model with the following parameters: α is the dip angle, β is the strike angle, δ is the angle of displacement direction, C is the hypocenter depth, L is the plane length, W is its width, N is the North direction (the axis is aligned with OY), Σ is the fault plane]

Рассматривая земную кору в виде однородного изотропного упругого полупространства, дадим строгое математическое описание приведенной выше модели. Воспользуемся положениями классической теории упругости и рассмотрим систему дифференциальных уравнений Навье, описывающую упругие деформации под действием массовых сил:

$$\mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}+(\lambda+\mu)\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}+X_i=0,\ \ i,j=1..3, \tag{1}$$

где λ,μ – коэффициенты Ламе, X_i – массовые силы.

В случае, когда массовые силы X_i распределены в некотором объеме пространства V и на бесконечности принимают нулевые значения, можно воспользоваться решениями Кельвина для определения поля перемещений [24]. Отметим, что очаг землетрясения расположен достаточно близко к поверхности Земли. Массовые, силы возникающие, в очаге значимо отличны от нуля вблизи поверхности Земли. Это не позволяет воспользоваться решениями Кельвина.

Определим поверхность Земли как плоскость $z=0$. И зададим на этой плоскости граничные условия следующего вида:

$$\sigma_{zx}|_{z=0}=\sigma_{zy}|_{z=0}=\sigma_{zz}|_{z=0}=0. \tag{2}$$

Один из подходов решения такой задачи был предложен Р. Миндлиным [25, 26]. Сам подход был основан на комбинации решений Кельвина для сил, расположенных в противоположных частях упругого полупространства. В своих работах Р. Миндлин привел аналитические решения для поля перемещений под действием различно направленных сил, приложенных к одной точке упругого полупространства.

Рассмотрим Декартову систему координат. Тогда в соответствии с работами Р. Миндлина u_i^j – i-ый компонент вектора перемещений в точке (x_1,x_2,x_3), соответствующий единичной силе величины F в точке (ξ_1,ξ_2,ξ_3) и направлении j, может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} u_i^j(x_1,x_2,x_3)=u_{iA}^j(x_1,x_2,-x_3)-u_{iA}^j(x_1,x_2,x_3)\\ +u_{iB}^j(x_1,x_2,x_3)+x_3u_{iC}^j(x_1,x_2,x_3)\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{cases} u_{iA}^j=\frac{F}{8\pi\mu}\left[(2-\alpha)\frac{\delta_{ij}}{R}+\alpha\frac{R_iR_j}{R^3}\right]\\ u_{iB}^j=\frac{F}{4\pi\mu}\left[\frac{\delta_{ij}}{R}+\frac{R_iR_j}{R^3}+\frac{1-\alpha}{\alpha}\left(\frac{\delta_{ij}}{R+R_3}+\frac{R_i\delta_{j3}-R_j\delta_{i3}(1-\delta_{j3})}{R(R+R_3)}-\right.\right.\\ \qquad\left.\left.\frac{R_iR_j}{R(R+R_3)^2}(1-\delta_{i3})(1-\delta_{j3})\right)\right]\\ u_{iC}=\frac{F}{4\pi\mu}(1-2\delta_{i3})\left[(2-\alpha)\frac{R_i\delta_{j3}-R_j\delta_{i3}}{R^3}+\alpha\xi_3\left(\frac{\delta_{ij}}{R^3}-\frac{3R_iR_j}{R^5}\right)\right],\end{cases} \tag{4}$$

где $\alpha=(\lambda+\mu)/(\lambda+2\mu)$, μ и λ – коэффициенты Ламе, δ_{ij} – символ Кронекера, $R_1=x_1-\xi_1$, $R_2=x_2-\xi_2$, $R_3=-x_3-\xi_3$, $R^2=R_1^2+R_2^2+R_3^2$.

Для того чтобы получить решения в виде так называемых «ядер деформации» будем брать соответствующие частные производные от $u_i^j(x_1,x_2,x_3)$ по координатам ξ_k:

$$\frac{\partial u_i^j(x_1,x_2,x_3)}{\partial \xi_k} = \frac{\partial u_{iA}^j(x_1,x_2,-x_3)}{\partial \xi_k} - \frac{\partial u_{iA}^j(x_1,x_2,x_3)}{\partial \xi_k} + \frac{u_{iB}^j(x_1,x_2,x_3)}{\partial \xi_k} + x_3 \frac{\partial u_{iC}^j(x_1,x_2,x_3)}{\partial \xi_k} \tag{5}$$

Дж. А. Стекетте [27], воспользовавшись принципом дислокаций Вольтерра, показал, что поле перемещений $u_k(x_1,x_2,x_3)$, соответствующее подвижке $\Delta u_j(\xi_1,\xi_2,\xi_3)$ вдоль поверхности Σ внутри однородного упругого пространства, может быть выражено следующим образом:

$$u_i = \frac{1}{8\pi\mu} \iint\limits_{\Sigma} \Delta u_k \omega_{kj}^i \nu_j d\Sigma, \tag{6}$$

где ν_j – направляющие косинусы нормали к поверхностному элементу $d\Sigma$.

Элементы ω_{kj}^i могут быть выражены через решения Р. Миндлина (5). В этом случае интеграл (6) будет представлен следующим образом:

$$u = \frac{1}{F} \iint\limits_{\Sigma} \Delta u_k \Big[\lambda \delta_{kj} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \Big(\frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} + \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k}\Big) \nu_j\Big] d\Sigma, \tag{7}$$

где δ_{jk} – символ Кронекера, λ и μ – коэффициенты Ламе, ν_k – направляющие косинусы нормали к поверхностному элементу $d\Sigma$, u_i^j – i-ый компонент вектора перемещений в точке (x_1,x_2,x_3), соответствующий точечной силе величины F в точке (ξ_1,ξ_2,ξ_3) и направлении j. Если $k=j$, то $\partial u_i^k/\partial \xi_j$ – это ядро деформации, соответствующее перемещениям от центра дилатации, а $\partial u_i^n/\partial \xi_n$ – соответствующее двойной силе без момента. Если $k \neq j$, то $(\partial u_i^k/\partial \xi_j + \partial u_i^j/\partial \xi_k)$ – ядра деформации, соответствующие полю перемещений под действием двух перпендикулярных пар двойных сил с моментами.

Будем считать вектор подвижки $\Delta \overline{u}$ постоянным и равным вектору $\overline{U}(U_1,U_2,U_3)$. Тогда выражение для поля перемещений, возникающего под действием подвижки величины $U_1 = U_{strike}$ по направлению простирания поверхности разрыва, примет следующий вид:

$$\overline{u} = \frac{(\lambda+\mu)U_1}{8\pi(\lambda+2\mu)} \iint\limits_{\Sigma} \Big[-\Big(\frac{\partial \overline{u}^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial \overline{u}^2}{\partial \xi_1}\Big)\sin(\delta) + \Big(\frac{\partial \overline{u}^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial \overline{u}^3}{\partial \xi_1}\Big)\cos(\delta)\Big] d\Sigma \tag{8}$$

Аналогично получим выражение для поля перемещений, возникающего под действием подвижки величины $U_2 = U_{dip}$ по направлению падения поверхности разрыва:

$$\overline{u} = \frac{(\lambda+\mu)U_3}{8\pi(\lambda+2\mu)} \iint\limits_{\Sigma} \Big[\Big(\frac{\partial \overline{u}^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial \overline{u}^3}{\partial \xi_2}\Big)\cos(2\delta) + \Big(\frac{\partial \overline{u}^3}{\partial \xi_3} - \frac{\partial \overline{u}^2}{\partial \xi_2}\Big)\sin(2\delta)\Big] d\Sigma \tag{9}$$

В случае прямоугольного источника с линейными размерами L и W поверхностный интеграл (7), опуская подинтегральное выражение, будет выглядеть следующим образом:

$$\overline{u} = \int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta'. \tag{10}$$

Если стороны прямоугольной площадки с длинами L и W сориентированы параллельно и перпендикулярно направлению простирания разрыва среды соответственно, ξ' и η' – это подстановки следующего вида:

$$\begin{cases} x \to x - \xi', \\ y \to y - \zeta' \cdot \cos(\delta), \\ c \to c - \zeta' \cdot \sin(\delta), \end{cases} \tag{11}$$

где δ – угол падения.

Для упрощения интегрирования введем еще ряд подстановок:

$$\begin{cases} x - \xi' = \xi, \\ p - \zeta' = \zeta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x \to \xi, \\ y \to \zeta \cdot \cos(\delta) + q \cdot \sin(\delta), \\ d \to \zeta \cdot \sin(\delta) - q \cdot \cos(\delta), \\ p \to \zeta. \end{cases} \tag{12}$$

где $p = y \cdot \cos(\delta) + d \cdot \sin(\delta)$, $d = c - z$.

Тогда интеграл (10) будет выражен в виде:

$$\overline{u} = \int\limits_{x}^{x-L} d\xi \int\limits_{p}^{p-W} d\zeta \tag{13}$$

Компактные аналитические решения приведенной модели можно найти, например, в работе Ю. Окада [14].

Учет накопленной энергии упругих деформаций при подготовке землетрясения

Отметим, что напряженно-деформированное состояние земной коры при подготовке землетрясений определяется полной накопленной энергией. Очевидно, что эта энергия существенно больше, чем высвободившаяся энергия упругих деформаций в момент землетрясений. Произведем учет полной энергии упругих деформаций через введение повышающих коэффициентов для характеристик очага готовящегося землетрясения.

Оценку линейных размеров площадки разрыва L (км) и W (км), а также величину подвижки U (см) для камчатских землетрясений можно произвести по

корреляционным формулам [28]:

$$\begin{aligned} lg(L) &= 0.75 \cdot M_W - 3.60, \\ lg(W) &= 0.75 \cdot M_W - 1.45, \\ lg(U) &= 0.75 \cdot M_W - 0.37, \end{aligned} \tag{14}$$

где M_W – моментная магнитуда.

В общем виде формулы (14) имеют вид:

$$lg(N_E) = a \cdot M_W - b, \tag{15}$$

где a и b – некоторые коэффициенты, N_E – характеристика очага землетрясения, рассчитанная с учетом высвободившейся энергии упругих деформаций.

Коэффициент эффективности снятия энергии упругих деформаций:

$$\eta = \frac{E}{W}, \tag{16}$$

где W – полная энергия упругих деформаций в области, включающей в себя очаг землетрясения, до активизации разлома.

В выражении (15) выразим моментную магнитуду через энергию землетрясения E, используя уравнение Гутенберга-Рихтера: $E = 10^{1.5M_W+5}$.Избавившись от знака логарифма, придем к следующему соотношению:

$$N_E = \left(\frac{E}{10^5}\right)^{(2/3)a} \cdot 10^b. \tag{17}$$

Заменяя в выражении (17) энергию землетрясения E на полную энергию упругих деформаций W, выраженную в свою очередь через E и η из формулы (16), придем к следующему соотношению:

$$N_W = \left(\frac{1}{\eta}\right)^{(2/3)a} \cdot N_E, \tag{18}$$

где N_W – характеристика очага землетрясения, рассчитанная с учетом полной энергии упругих деформаций, а коэффициент вида $(1/\eta)^{(2/3)a}$ несет в себе смысл повышающего коэффициента для корреляционных формул (14), позволяющий рассчитать напряженно–деформированное состояние земной коры с учетом полной энергии упругих деформаций при подготовке землетрясения.

Существуют различные подходы к оценке как эффективных сбрасываемых напряжений [29, 30], так и к оценке эффективности снятия энергии упругих деформаций. Например, наиболее точный подход к оценке коэффициента эффективности снятия энергии упругих деформаций η, требующий реконструкции тектонических напряжений в сейсмоактивном регионе, описан Ю.Л. Ребецким [31]. И. П. Добровольский [17] предложил менее точный, но более простой для вычислений вариант оценки данного коэффициента:

$$\eta = 10^{0.26M_W} - 2.93. \tag{19}$$

Ввиду трудоемкости реконструкции тектонических напряжений в каждом конкретном сейсмоактивном регионе, в дальнейших расчетах будем опираться именно на формулу (19), предложенную И. П. Добровольским.

Вычислительный эксперимент

Ввиду линейности дифференциальных уравнений Навье, заложенных в основу модели, решение в случае произвольно ориентированной подвижки, не ассоциированной с раздвигом, может быть получено в виде линейной комбинации решений для подвижек по направлению простирания и падения. Величины соответствующих компонентов вектора подвижки:

$$U_{strike} = U \cdot \cos(\delta), \tag{20}$$

$$U_{dip} = U \cdot \sin(\delta), \tag{21}$$

где U_{strike} – компонент вектора подвижки по простиранию, U_{dip} – по падению, δ – угол направления подвижки.

Перейти от перемещений к напряжениям и деформациям можно при помощи следующих выражений:

$$\sigma_{ij} = \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{ii} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \tag{22}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right). \tag{23}$$

Для пересчета географических координат в декартовы воспользуемся проекцией Меркатора. С целью упрощения расчетов в случае каждого землетрясения построим дополнительную систему координат с началом в точке эпицентра землетрясения и повернутую относительной оси OZ исходной системы на угол $\beta - 90^\circ$. Таким образом, оси OX' и OY' окажутся параллельны проекциям сторон L и W площадки подвижки на плоскость $z = 0$.

Некоторые параметры очага землетрясения $(\alpha, \beta, \delta, C)$ могут быть взяты непосредственно из Гарвардского каталога механики очагов землетрясений «CMT Catalog». Оценку линейный размеров площадки разрыва L и W, а также величину подвижки U с учетом полной энергии упругих деформаций при подготовке землетрясения произведем по формулам (14, 18, 19). Параметры упругого полупространства примем следующими: $\nu = 3.675 \cdot 10^{10}$Н/м^2, $\lambda = 3.675 \cdot 10^{10}$Н/м^2. Такие значения коэффициентов Ламе ν и λ соответствуют крепким горным породам.

Произведем моделирование областей повышенных деформаций земной коры при подготовке двух землетрясений, произошедших у берегов Камчатки. Землетрясение № 1 с магнитудой $M_W = 5.3$ произошло 05.01.2022 в 7:22:29.0, координаты эпицентра – 56.03 с.ш., 165.08 в.д., глубина гипоцентра – 15.1 км. Землетрясения № 2 с магнитудой $M_W = 5.0$ произошло 23.06.2022 в 1:45:19.5, координаты эпицентра – 50.34 с.ш., 157.64 в.д., глубина гипоцентра – 41.8 км.

Вычисление выполним на прямоугольной географической сетке с шагом $\tau = 0.005^\circ$. Координата верхнего левого угла сетки: $(C_{lat} - 8.0^\circ, C_{lon} + 8.0^\circ)$; координаты правого нижнего угла стеки: $(C_{lat} + 8.0^\circ, C_{lon} - 8.0^\circ)$, C – точка с координатами эпицентра землетрясения, C_{lat} и C_{lon} – значение широты и долготы точки соответственно.

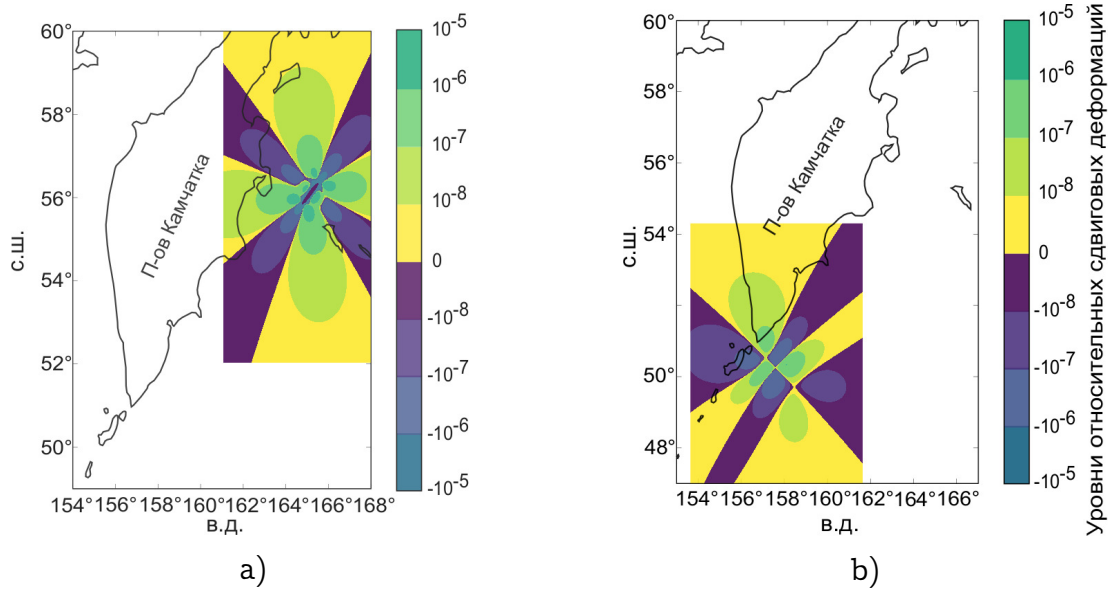


Рис. 2. Области сдвиговых деформаций, определяемые компонентом ε_{xy} тензора деформации, на поверхности земли $z = 0$, перед землетрясением № 1 (a) и землетрясением № 2 (b). Отрицательные значения соответствуют области сжатия, положительные – области растяжения.

[Figure 2. Zones of relative shear deformations, determined by the strain tensor component ε_{xy}, on the Earth's surface $z = 0$ before earthquake No. 1. (a) and earthquake No. 2. (b). Negative values correspond to the compression region, positive values – to the stretching region]

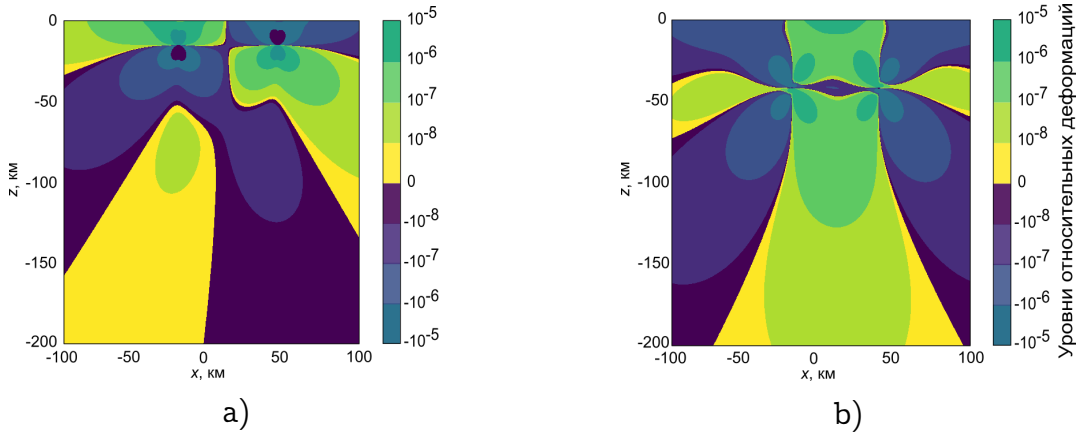
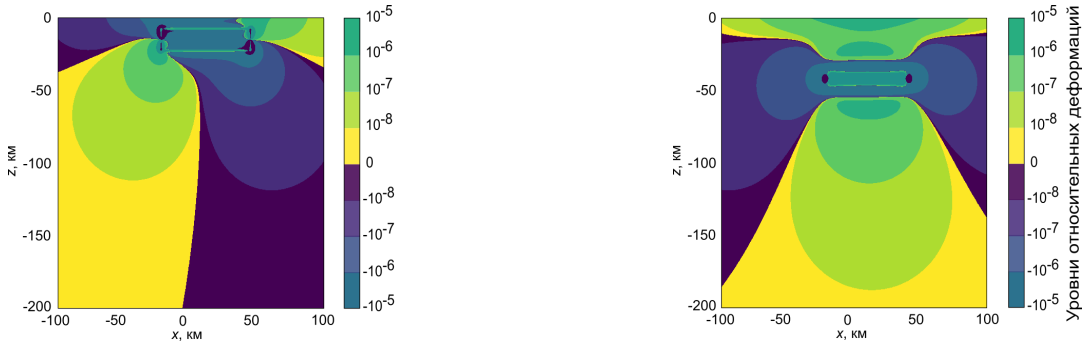


Рис. 3. Значения компонента ε_{xx} тензора деформации в плоскости сечения $y = 0$, определяющего деформации пород при подготовки землетрясения № 1 (a) и землетрясения № 2 (b). Отрицательные значения соответствуют области сжатия, положительные – области растяжения.

[Figure 3. Values of the deformation tensor component ε_{xx} in the section plane $y = 0$, determine the deformations of rocks during the preparation of earthquake № 1 (a) and earthquake № 2 (b). Negative values correspond to the compression region, positive values – to the stretching region]

Результаты моделирование представлены на рис.2–4.



a) b)

Рис. 4. Значения компонента ε_{yy} тензора деформации в плоскости сечения $y = 0$, определяющего деформации пород при подготовке землетрясения № 1 (a) и землетрясения № 2 (b). Отрицательные значения соответствуют области сжатия, положительные – области растяжения.
[Figure 4. Values of the deformation tensor component ε_{yy} in the section plane $y = 0$, determine the deformations of rocks during the preparation of earthquake № 1 (a) and earthquake № 2 (b). Negative values correspond to the compression region, positive values – to the stretching region]

Результат моделирования показывает, что при подготовке камчатских землетрясений деформационные возмущения, превышающие приливные ($> 10^{-8}$), могут распространяться на расстояния до сотен километров от источника готовящегося землетрясения. Так, на рис. 2 видно, что области повышенных относительных сдвиговых деформаций, определяемые компонентом ε_{xy} тензора деформаций, распространяются на расстояние ≈ 300 км в разных направлениях от источника землетрясения № 1 на поверхности Земли. При подготовке землетрясения № 2 аналогичные области распространяются на меньшее расстояние. Это связано с более низкой энергетикой и большей глубиной гипоцентра по сравнению с землетрясением № 1. Кроме этого наблюдается несколько большая ассиметрия областей, что является причиной большего угла падения плоскости разрыва землетрясения № 2. Относительные деформации, определяемые компонентами тензора деформации ε_{xx} и ε_{yy}, затухают с глубиной на расстоянии ≈ 100 км при подготовке землетрясение № 1 и ≈ 200 км при подготовке землетрясения № 2.

Заключение

Механические процессы при подготовке землетрясений вызывают изменения напряженно-деформированного состояния земной коры вокруг очагов. Эти изменения приводят к возникновению аномалий в различных геофизических полях, наблюдаемых в сейсмоактивных регионах планеты, в том числе и на Камчатке. Применение методов математического моделирования позволяет обосновать возможность возникновения аномалий под действием очага готовящегося землетрясения.

В настоящей работе описан подход к оценке областей повышенных деформаций земной коры при подготовке камчатских землетрясений. Предложено обобщение классической модели расчета косейсмических деформаций при помощи введения повышающих коэффициентов, зависящих от эффективности снятия энергии упругих деформаций. Показано, что при подготовке двух камчатских землетрясений с магнитудами $M_W \approx 5$, области повышенных деформаций распространяются на расстояния до сотен километров от очагов землетрясений.

Перспективным с точки зрения дальнейшего обобщения модели является вопрос распределения силового воздействия по плоскости разрыва Σ. Полагая его отличным от равномерного, можно вводить различные функции распределения, получая при этом новые решения модели. Вопрос получения аналитических решений, как в случае классической модели, остается открытым, и требует дальнейшего исследования.

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

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литературы

1. 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. no. 10, pp. 319–337 DOI: 10.5194/nhess-10-319-2010.
2. Uyeda S., Nagao T., Kamogawa M. Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics, *Tectonophysics*, 2009. vol. 470, pp. 205–213 DOI: 10.1016/j.tecto.2008.07.019.
3. Chen C.-H, Liu J.-Y., Lin P.Y., Yen H.-Y., Hattori K., Liang W.-T., Chen Y.-I., Yeh Y-H, Zeng X. Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location, *Tectonophysics*, 2010. vol. 489, pp. 240–247 DOI: 10.1016/j.tecto.2010.04.018.
4. Shah M., Jin S. Pre-seismic ionospheric anomalies of the 2013 $M_W = 7.7$ Pakistan earthquake from GPS TEC and COSMIC observations, *Geodesy and Geodynamics*, 2018. vol. 9, no. 5 DOI: 10.1016/j.geog.2017.11.008.
5. Руленко О. П., Марапулец Ю. В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А. Совместное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электричества по даннным наблюдений на Камчатке, *Физика Земли*, 2019. №5, С. 76–86 DOI: 10.31857/S0002-33372019576-866.
6. Kopylova G., Kasimova V., Lyubushin A., Boldina S. Variability in the Statistical Properties of Continuous Seismic Records on a Network of Stations and Strong Earthquakes: A Case Study from the Kamchatka Peninsula, 2011–2021., *Applied Sciences*, 2022,. vol. 8658, no. 12 DOI: 10.3390/app12178658.
7. Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений, *Физика Земли*, 2017. №2, С. 84–96 DOI: 10.7868/S0002333717010124.
8. Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия.* Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
9. Луковенкова О. О., Малкин Е. И., Мищенко М. А., Солодчук А. А. Аномалии перед камчатскими землетрясениями ($M_L \geq 4.75$) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.*, 2021. Т. 34, №1, С. 137–149 DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149.
10. Turcotte D., Shubert G. *Geodynamics, 3rd Edition.* Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 636 pp.
11. Sholz C. *The mechanics of earthquakes and faulting, 3rd Edition.* Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 512 pp.

12. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology, 2nd ed.* Cambridge: University Science Books, 2002. 704 pp.

13. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America.* vol. 75, no. 4, pp. 1135–1154 DOI: 10.1785/BSSA0750041135.

14. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America.* vol. 82, no. 2, pp. 1018–1040 DOI: 10.1785/BSSA0820021018.

15. Takagi Y., Okubo S. Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere, *Geophysical Journal International*, 2017. vol. 208, no. 2, pp. 973–991 DOI: 10.1093/gji/ggw424.

16. Liu T., Fu G., She Y., Zhao C. Co-seismic internal deformations in a spherical layered earth model, *Geophysical Journal International*, 2020. vol. 221, no. 3, pp. 1515–1531 DOI: /10.1093/gji/ggaa086.

17. Добровольский И. П *Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения.* М.: Физматлит, 2009. 240 с.

18. Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника, *Вычислительная сейсмология*, 2001. Т. 32, С. 81–97.

19. 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.

20. 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.

21. Пережогин А. С. О зонах геоакустической эмиссии в упругом приближении среды, *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о земле*, 2009. Т. 13, № 1, С. 198–201.

22. Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А. Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями, *Тихоокеанская геология*, 2012. Т. 31, № 1, С. 96–106 DOI: 10.1134/S1819714012010113.

23. Гапеев М. И., Марапулец Ю. В. Моделирование зон относительных сдвиговых деформаций перед сильными землетрясениями на Камчатке, произошедшими в период 2018–2021 гг., *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 37, № 4, С. 53–66 DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66.

24. Новацкий В. *Теория упругости.* Москва: МИР, 1975. 872 с.

25. Mindlin R. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinity Solid, *Journal of Applied Physics*, 1936. vol. 7, no. 5, pp. 195–202 DOI: 10.1063/1.1745385.

26. Mindlin R., Cheng D. Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid, *Journal of Applied Physics*, 1950. vol. 21, no. 9, pp. 926–930 DOI: 10.1063/1.1699785.

27. Steketee J.A. On Volterra's disloacations in a semi-infinity elastic medium, *Canadian Journal of Physics*, 1958. Т. 36, № 2, С. 192-205 DOI: 10.1139/p58-024.

28. Гусев А. А., Мельникова В. Н. Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки, *Вулканология и сейсмологи.* Т. 6, С. 55–63.

29. Bath M., Duda S. J. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities, *Annals of Geophysics*, 1964. vol. 17, no. 3, pp. 353–368 DOI: 10.4401/ag-5213.

30. Kanamori H. The radiated energy of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake / *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting (Geophysical Monograph Series)*. Washington, American Geophysical Union, pp. 59–60.

31. Ребецкий Ю. Л. *Тектонические напряжения и прочность природных массивов.* Москва: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.

Гапеев Максим Игоревич – аспирант Камчатского государственного университета имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, младший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия, ORCID 0000-0001-5798-7166.

MSC 86-10 Research Article

Estimating the increased deformations areas that occur during the preparation of Kamchatka earthquakes

M. I. Gapeev[1,2]

[1] Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

[2] Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Pogranichnaya str., 4, Russia

E-mail: owlptr@yandex.ru

The article is devoted to mathematical modeling of increased deformations areas of the Earth's crust that occur during the preparation of Kamchatka earthquakes. For this purpose, a generalization of the classical model of the Earth's crust co-seismic deformations, proposed by Yu. Okada, was made. The generalization is consisted in the introduction of increasing coefficients depending on the seismic efficiency. Based on the developed model, the deformation fields, that occurred during the preparation of two Kamchatka earthquakes, were simulated. It is shown that the areas of increased deformations extend hundreds of kilometers from the sources of upcoming earthquakes both on the surface of the Earth's crust and in its thickness.

Key words: mathematical modeling, deformation of the earth's crust, earthquake focus, seismic efficiency, pre-seismic anomalies

DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46

Original article submitted: 02.12.2022 Revision submitted: 06.12.2022

For citation. Gapeev M. I. Estimating the increased deformations areas that occur during the preparation of Kamchatka earthquakes. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, **41**: 4, 32-46. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46

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.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Gapeev M. I., 2022

References

[1] 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, 10, 319–337. DOI: 10.5194/nhess-10-319-2010

Funding. The work was carried out as part of the implementation of the state task AAAA-A21-121011290003-0

[2] Uyeda S., Nagao T., Kamogawa M. Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics. Tectonophysics, 2009, 470, 205–213. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.07.019

[3] Chen C.-H, Liu J.-Y., Lin P.Y., Yen H.-Y., Hattori K., Liang W.-T., Chen Y.-I., Yeh Y-H, Zeng X. Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location. Tectonophysics, 2010, 489, 240–247. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.04.018

[4] Shah M., Jin S. Pre-seismic ionospheric anomalies of the 2013 $M_W = 7.7$ Pakistan earthquake from GPS TEC and COSMIC observations, Geodesy and Geodynamics, 2018, 9:5, 378–387. DOI: 10.1016/j.geog.2017.11.008

[5] Rulenko O. P. Marapulets Y. V., Kuz'min Y.D.3, Solodchuk A. A. Joint perturbation in geoacoustic emission, radon, thoron, and atmospheric electric field based on observations in Kamchatka, 2019, 5, 76–78. DOI: 10.31857/S0002-33372019576-86

[6] Kopylova G., Kasimova V., Lyubushin A., Boldina S. Variability in the Statistical Properties of Continuous Seismic Records on a Network of Stations and Strong Earthquakes: A Case Study from the Kamchatka Peninsula, 2011–2021. Appl. Sci., 2022, 8658:12. DOI: 10.3390/app12178658

[7] Saltykov V. A. On the possibility of using the tidal modulation of seismic waves for forecasting earthquakes. Izvestiya, Physics Of The Solid Earth, 2017, 53:2, 250–261. DOI: 10.1134/S1069351317010128

[8] Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M. Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya [Mesoscale acoustic emission]. Vladivostok, Dal'nauka, 2012, 126 (In Russian)

[9] Lukovenkova O. O., Malkin E. I., Mishchenko M. A., Solodchuk A. A. Anomalies in electromagnetic and geoacoustic emission signals before Kamchatka earthquakes ($M_L \geq 4.75$) in 2013. Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2021, 34:1, 137–149.DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149 (In Russian)

[10] Turcotte D., Shubert G. Geodynamics, 3rd Edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2014, 636.

[11] Sholz C. The mechanics of earthquakes and faulting, 3rd Edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2019, 512.

[12] Aki K., Richards P. Quantitative Seismology, 2nd ed. Cambridge, University Science Books, 2002, 704.

[13] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75:4, 1135–1154. DOI: 10.1785/BSSA0750041135

[14] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 1992, 82:2, 1018–1040. DOI: 10.1785/BSSA0820021018

[15] Takagi Y., Okubo S. Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere. Geophysical Journal International, 2017, 208:2, 973–991. DOI: 10.1093/gji/ggw424

[16] Liu T., Fu G., She Y., Zhao C. Co-seismic internal deformations in a spherical layered earth model. Geophysical Journal International, 2020, 221:3, 1515–1531. DOI: /10.1093/gji/ggaa086

[17] Dobrovol'skij I. P. Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya [Mathematical theory of preparation and prediction of tectonic earthquake]. Moscow, Fizmatlit, 2009, 240 (In Russian)

[18] Alekseev A. S., Belonosov A. S., Petrenko V. E. O koncepcii mnogodisciplinarnogo prognoza zemletryasenij s ispol'zovaniem integral'nogo predvestnika. Vychislitel'naya sejsmologiya [On the concept of multidisciplinary earthquake prediction using an integral predictor]. Vychislitel'naya sejsmologiya [Computational seismology], 2001, 32, 81–97. (In Russian)

[19] Perezhogin A. S,., Shevtsov B. M., Sagitova R. N., Vodinchar G. M.Geoacoustic emission's zones modeling. Mathematical Models and Computer Simulations, 2007, 19:11, 59–64. (In Russian)
[20] Perezhogin A. S., Shevtsov B. M. Models of an intense-deformed condition of rocks before earthquakes and their correlation with geo-acoustic emission. Vychislitel'nye tekhnologii, 2009, 14:3, 48–57. (In Russian)
[21] Perezhogin A. S. Geoacoustic emission zones in an elastic model of continuum. Bulletin KRASEC. Earth science, 2009, 13:1, 198–201. (In Russian)
[22] Saltykov V. A., Kugaenko Y. A. Development of near-surface dilatancy zones as a possible cause for seismic emission anomalies before strong earthquakes. Russian Journal of Pacific Geology, 6:1, 86–95. DOI: 10.1134/S1819714012010113
[23] Gapeev M. I., Marapulets Yu. V. Modeling of relative shear deformation zones before strong earthquakes in Kamchatka from 2018-2021. Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki, 2021, 37:4, 53-66. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66 (In Russian)
[24] Novatskiy V. Teoriya uprugosti [Teoriya uprugosti]. Moscow, MIR, 1975, 872 (In Russian)
[25] Mindlin R. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinity Solid. Journal of Applied Physics, 1936, 7, 195–202. DOI: 10.1063/1.1745385
[26] Mindlin R., Cheng D. Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid. Journal of Applied Physics, 1950, 21:9, 926–930. DOI: 10.1063/1.1699785
[27] Steketee J. A. On Volterra's disloacations in a semi-infinity elastic medium. Canadian Journal of Physics, 1958, 36:2, 192–205. DOI: 10.1139/p58-024
[28] Gusev A. A., Melnikova V. N. Relations between magnitudes: global and Kamchatka data. Journal of Volcanology and Seismology, 1990, 6, 55–63. (In Russian)
[29] Bath M., Duda S. J. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities. Annals of Geophysics, 1964, 17:3, 353–368.DOI: 10.4401/ag-5213
[30] Kanamori H. The radiated energy of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. In: Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting (Geophysical Monograph Series). Washington, American Geophysical Union, 59–60.
[31] Rebeckij Yu. L. Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' prirodnyh massivov [Tectonic stresses and strength of natural massifs]. M: IKC «Akademkniga», 2007, 406 (In Russian)

Gapeev Maksim Igorevich – Postgraduate student of Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Junior Researcher, Lab. of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia, ORCID 0000-0001-5798-7166.