МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 51-7:550.3

Научная статья

Моделирование зон относительных сдвиговых деформаций перед сильными землетрясениями на Камчатке, произошедшими в период 2018-2021 гг

М. И. Гапеев^{1,2}, Ю. В. Марапулец¹

¹ Институт космифизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

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

E-mail: gml6493@gmail.com

Представлено сравнительное моделирование зон относительных сдвиговых деформаций для четырех камчатских землетрясений с $M_w \geq 4.8$, произошедших в период с декабря 2018 г. по март 2021 г., основанное на статической модели деформационного поля в рамках теории упругости. Земная кора рассмотрена как однородное изотропное упругое полупространство, в котором присутствуют различные источники напряжения, описывающие очаг землетрясения: точечный источник в виде единичной силы, точечный источник в виде комбинации девяти двойных сил, распределенный источник в виде прямоугольной площадки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние земной коры, относительные сдвиговые деформации, модель очага землетрясения, зоны повышенных деформаций.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66

Поступила в редакцию: 15.11.2021

В окончательном варианте: 11.12.2021

Для цитирования. 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

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

© Гапеев М. И., Марапулец Ю. В., 2021

Введение

Под действием лунно-солнечных приливов, вариаций метеопараметров, собственных колебаний Земли, тектонических сил и других причин постоянно деформируются приповерхностные породы земной коры. Этот фоновый

Финансирование. Исследования выполнены в рамках реализации государственного задания АААА-А21-121011290003-0.

деформационный процесс протекает повсеместно. В сейсмоактивных регионах, где приток тектонической энергии больше и происходят землетрясения, породы деформируются сильнее, что отражается в поведении геофизических полей различной природы. Известно, что землетрясениям предшествует длительный процесс подготовки. Предложено много моделей этого процесса, имеющих различия в деталях, но одинаково описывающих основные этапы подготовки [1, 2, 3]. Первый из них обусловлен накоплением упругой потенциальной энергии в гипоцентральной области. Его продолжительность растет с магнитудой готовящегося землетрясения и может измеряться годами. Следующий этап характеризуется пластическими подвижками, образованием микротрещин, форшоками, длится от нескольких часов до нескольких суток и заканчивается образованием магистрального разрыва, т.е. очага землетрясения.

Именно на этом, втором этапе, в различных геофизических полях на достаточно больших расстояниях от готовящегося землетрясения наблюдаются аномальные возмущения. Они возникают перед землетрясениями магнитудой $M > 4 - 5$ на расстоянии до первых сотен километров от эпицентра и интерпретируются как предвестники [4, 5, 6]. Поскольку процесс подготовки сейсмического события имеет в первую очередь механическую природу, аномалии в геофизических полях связывают с изменением напряженно-деформированного состояния, возникающего в породах вокруг очага. Поля напряжений и деформаций земной коры исследовали в своих работах Теркот Д., Шуберт Дж., Николаевский В.Н., Алексеев А.С., Добровольский И.П., Окада Ё, Касахара М., Аки К. и др. Добровольский И.П. В своих работах [7, 1] ввел понятие зоны проявления предвестников и показал, что ее размер будет обусловлен энергией готовящегося землетрясения. Он предложил ограничить размеры этой зоны границами, за которыми аномалии в деформациях не будут превышать фоновый деформационный процесс (10^{-8}), и ввел достаточно простую формулу для оценки ее радиуса: $R = 10^{0.433} \approx e^M$ км, где M - магнитуда землетрясения, e - трансцендентное число, основание натуральных логарифмов. Алексеев А.С. связал аномалии в геофизических полях, возникающие в сейсмоактивных регионах, с образованием зон нелинейного разуплотнения геосреды (дилатансий). В работе [8] в приближении упругого изотропного полупространства было смоделировано наличие таких зон, образующихся в окрестности очагов землетрясений при напряжениях близких к разрушительным значениям для горных пород.

Среди выявленных предсейсмических аномальных возмущений в геофизических полях регистрируется увеличение геоакустической эмиссии в килогерцовом диапазоне частот. Такие аномалии наблюдаются в различных сейсмоактивных регионах мира: в Армении [9], в Италии [10], в России на Камчатке [11, 12]. Само явление акустической эмиссии проявляется в виде генерации упругих волн в твердых телах при изменении их напряженно-деформированного состояния, т.е. является прямым следствием роста упругих напряжений в среде. Поэтому метод акустической эмиссии нашел широкое применение для диагностирования состояния твердых сред и материалов, находящихся при повышенных нагрузках.

В сейсмоактивном регионе полуостров Камчатка исследования геоакустической эмиссии проводятся в различных диапазонах частот. Исследуется высокочастотный сейсмический шум [13], геоакустическая эмиссия в скважинах [14], геоакустическая эмиссия в широкополосном звуковом диапазоне частот [15]. Во всех этих исследованиях показано, что при подготовке сейсмических событий возникает рост

геоакустического излучения, а в качестве основной причины этого роста указывается изменение напряженно-деформированного состояния, возникающего в земной коре. Для подтверждения этого производилось моделирование полей напряжений, формирующегося вокруг очагов камчатских землетрясений. Использовались разные подходы при описании очага: точечный источник в виде единичной силы [16], двойной силы [17, 18], распределенный источник в виде прямоугольной площадки [19]. Во всех случаях было показано, что вокруг очага землетрясения на расстояниях сотен километров возникают области с деформациями, превышающими фоновые значения. В работе [16] для них было введено понятие «зоны геоакустической эмиссии».

В предлагаемой работе для четырех сильных камчатских землетрясений приведено сравнительное моделирование полей напряжений с использованием разных моделей очага.

2. Математическая постановка задачи напряженно-деформированного состояния земной коры

В соответствии с принятыми в геофизике и сейсмологии допущениями литосферу можно рассматривать как упругую среду [20]. На момент проведения исследования в практике моделирования деформаций земной коры существуют следующие модификации упругого пространства: однородное и слоистое изотропное упругое полупространства [21, 22], однородная и слоистая упругая симметричная сферы [23, 24].

Поскольку в настоящем исследовании нас интересует именно качественное сравнение источников напряжений с точки зрения их влияние на формирование зон относительных сдвиговых деформаций, то задачу моделирования деформаций земной коры в некоторой ограниченной области мы сведем к рассмотрению деформаций однородного изотропного упругого полупространства.

Для описания напряжений и деформаций, происходящих в упругом однородном полупространстве под действием массовых сил, воспользуемся системой дифференциальных уравнений равновесия [25]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = 0, \quad i = 1..3, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжения, а X_i – массовые силы.

Если в уравнение (1) подставить соотношения, связывающие тензор напряжения с тензором деформаций:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{ii} + 2\mu \epsilon_{ij}, \quad (2)$$

а компоненты тензора деформаций ϵ_{ij} выразить через производные вектора перемещений $u_{i,j}$:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

то исходная система уравнений (1) будет представлена в следующем виде:

$$\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + X_i = 0, \quad i, j = 1..3, \quad (4)$$

λ, μ – коэффициенты Ламэ.

Выражения (4) образуют систему трех уравнений в частных производных второго порядка эллиптического типа. Это система дифференциальных уравнений Навье.

Граничные условия уравнений (1) для рассматриваемой задачи задаются на поверхности $z = 0$:

$$\sigma_{zx}|_{z=0} = \sigma_{zy}|_{z=0} = \sigma_{zz}|_{z=0} = 0. \quad (5)$$

Воспользовавшись соотношениями (2) и (3) можно выразить эти условия через перемещения.

Удобно для дальнейшего решения поставленной задачи представить систему уравнений (4) в виде, предложенным Галеркиным, через три функции. Сначала запишем уравнения Навье в сокращенной операторной форме:

$$L_{i,j}(u_j) + \frac{X}{\mu} = 0, \quad (6)$$

где $L_{i,j} = \delta_{i,j} \nabla + k \partial_i \partial_j$, $k = \frac{\lambda + \mu}{\mu}$, δ_{ij} – символ Кронекера.

Далее выразим компоненты перемещения u_i через некоторую векторную функцию χ :

$$u_1 = \begin{vmatrix} \chi_1 & L_{12} & L_{13} \\ \chi_2 & L_{22} & L_{23} \\ \chi_3 & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix}, \quad u_2 = \begin{vmatrix} L_{11} & \chi_1 & L_{13} \\ L_{21} & \chi_2 & L_{23} \\ L_{31} & \chi_3 & L_{33} \end{vmatrix}, \quad u_3 = \begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & \chi_1 \\ L_{21} & L_{22} & \chi_2 \\ L_{31} & L_{32} & \chi_3 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Подставив выражения (7) в (6) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$\nabla^2 \nabla^2 \nabla^2 \chi_i + \frac{X_i}{\lambda + 2\mu} = 0. \quad (8)$$

Введя три новые функции $H_i = \nabla^2 \chi_i$, получим соотношения для перемещений:

$$\mathbf{u} = (1 + k) \nabla^2 \mathbf{H} - k \cdot \text{grad div } \mathbf{H}. \quad (9)$$

Уравнение (8) сводится к неоднородной системе уравнений:

$$(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{X} = 0. \quad (10)$$

Вектор $\mathbf{H}$ называется вектором Галеркина.

Компоненты тензора напряжений через вектор Галеркина выражаются следующим образом:

$$\sigma_{ii} = 2(1 - \nu) \nabla^2 H_{ii} + \mu \nabla^2 \text{div } \mathbf{H} - (\text{div } \mathbf{H})_{ii}, \quad (11)$$

$$\sigma_{ij} = (1 - \nu)(H_{i,kkj} + H_{j,kki}) - (\text{div } \mathbf{H})_{ij}. \quad (12)$$

Индексы, стоящие после запятой, обозначают дифференцирование по соответствующим координатам.

Воспользовавшись выражениями (11) и (12) можно представить поставленные граничные условия (5) в терминах вектора Галеркина.

3. Аналитические решения поставленной задачи

Решения Кельвина и Миндлина

Решением задачи определения поля перемещений под действием массовых сил, расположенных внутри упругого полупространства занимался Р. Миндлин. В своих работах [26, 27] он решил эту задачу для различно-направленных единичных и двойных сил, в том числе и для двойных сил с моментами.

Свои решения Миндлин выразил через комбинацию ядер деформации для упругого пространства, предложенных У. Кельвином, напряжения, определяемые которыми, стремятся к нулю на бесконечности. Решения Миндлина также по аналогии с решениями Кельвина можно назвать ядрами деформации для упругого полупространства или полупространственными ядрами деформации. Эти ядра будут удовлетворять условиям на свободной поверхности (5).

Решения Кельвина применимы к тем задачам, в которых источник напряжений расположен на большом расстоянии от граничной поверхности. В то время, как предложенные Миндлином решения позволяют решать задачи, в которых источник напряжений расположен вблизи свободной поверхности.

Выражения полупространственных ядер деформации в виде векторов Галеркина для единичных и двойных сил выглядят следующим образом:

- Единичная сила в направлении оси OX :

$$\mathbf{i} \left\{ R_1 + R_2 - \frac{2c^2}{R_2} + 4(1-\nu)(1-2\nu) \cdot [(z+c)\log(R_2+z+c) - R_2] \right\} + \mathbf{k} \left[\frac{2cx}{R_2} + 2(1-2\nu)x \log(R_2+z+c) \right] \quad (13)$$

- Единичная сила в направлении оси OY :

$$\mathbf{j} \left\{ R_1 + R_2 - \frac{2c^2}{R_2} + 4(1-\nu)(1-2\nu) \cdot [(z+c)\log(R_2+z+c) - R_2] \right\} + \mathbf{k} \left[\frac{2cy}{R_2} + 2(1-2\nu)y \log(R_2+z+c) \right] \quad (14)$$

- Единичная сила в направлении оси OZ :

$$\mathbf{k} \left\{ R_1 + [8\nu(1-\nu) - 1]R_2 + 4(1-2\nu)[(1-\nu)z - \nu c] \log(R_2+z+c) - \frac{2cz}{R_2} \right\} \quad (15)$$

- Двойная сила в направлении оси OX :

$$\mathbf{i} x \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} + \frac{2c^2}{R_2^3} \right] + \mathbf{k} \left[\frac{2c}{R_2} - \frac{2cx^2}{R_2^3} + \frac{2(1-2\nu)x^2}{R_2(R_2+z+c)} + 2(1-2\nu)\log(R_2+z+c) \right] \quad (16)$$

- Двойная сила в направлении оси OY

$$\mathbf{j}y \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} + \frac{2c^2}{R_2^3} \right] + \mathbf{k} \left[\frac{2c}{R_2} + 2(1-\nu)\log(R_2+z+c) + \frac{2(1-2\nu)y^2}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{2cy^2}{R_2^3} \right] \quad (17)$$

- Двойная сила в направлении оси OZ :

$$\mathbf{k} \left[\frac{z-c}{R_1} - (1-4\nu)\frac{z-c}{R_2} - \frac{2cz(z+c)}{R_2^3} + 4\nu(1-2\nu)\log(R_2+z+c) \right] \quad (18)$$

- Двойная сила в направлении оси OX с моментом относительно оси OY :

$$\mathbf{i} \left[\frac{z-c}{R_1} - \frac{z-3c}{R_2} - \frac{2c^2(z+c)}{R_2^3} - 4(1-\nu)(1-2\nu)\log(R_2+z+c) \right] + \mathbf{k}2x \left[\frac{c(z+c)}{R_2^3} - \frac{2(1-\nu)}{R_2} \right] \quad (19)$$

- Двойная сила в направлении оси OX с моментом относительно оси OZ :

$$\mathbf{i}y \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2c^2}{R_2^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \right] + \mathbf{k}2xy \left[\frac{1-2\nu}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{c}{R_2^3} \right] \quad (20)$$

- Двойная сила в направлении оси OY с моментом относительно оси OX :

$$\mathbf{j} \left[\frac{z-c}{R_1} - \frac{z-3c}{R_2} - \frac{2c^2(z+c)}{R_2^3} - 4(1-\nu)(1-2\nu)\log(R_2+z+c) \right] + \mathbf{k}2y \left[\frac{c(z+c)}{R_2^3} - \frac{2(1-\nu)}{R_2} \right] \quad (21)$$

- Двойная сила в направлении оси OY с моментом относительно оси OZ :

$$\mathbf{j}x \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{2c^2}{R_2^3} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2+z+c} \right] + \quad (22)$$

$$\mathbf{k}2xy \left[\frac{1-2\nu}{R_2(R_2+z+c)} - \frac{c}{R_2^3} \right] \quad (23)$$

- Двойная сила в направлении оси OZ с моментом относительно оси OX :

$$\mathbf{k}y \left[\frac{1}{R_1} + \frac{8\nu(1-\nu)-1}{R_2} + \frac{4(1-2\nu)[(1-\nu)z-\nu c]}{R_2(R_2+z+c)} + \frac{2cz}{R_2^3} \right] \quad (24)$$

- Двойная сила в направлении оси OZ с моментом относительно оси OY :

$$\mathbf{k}x \left[\frac{1}{R_1} + \frac{8\nu(1-\nu)-1}{R_2} + \frac{4(1-2\nu)[(1-\nu)z-\nu c]}{R_2(R_2+z+c)} + \frac{2cz}{R_2^3} \right] \quad (25)$$

$R_1 = \sqrt{x^2+y^2+(z-c)^2}$, $R_2 = \sqrt{x^2+y^2+(z+c)^2}$. Силы приложены к точке с координатами $(0,0,c)$.

Сосредоточенный источник напряжений

Очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности Земли, возникающий под действием накопленных сдвиговых напряжений. Наблюдение характеристик землетрясений свидетельствует о локальной потере неустойчивости среды [28]. В механике сплошных сред, в частности и теории упругости, процесс потери устойчивости среды исследуется при неизменных свойствах материала среды и без нарушения его сплошности.

Для описания силового эквивалента при произвольно ориентированном разрыве смещений существует девять возможных пар сил. Система этих пар сил представлена на рис. 1.

Рис. 1. Девять возможных пар сил, необходимых для получения силового эквивалента при произвольно ориентированном разрыве смещений в среде

Аналитические выражения для расчета поля напряжений под действием описанной выше системы сил, получим при помощи линейной комбинации векторов Галеркина (16–25) и выражений (11, 12).

Распределенный источник напряжений в виде прямоугольной площадки

Более точную модель очага землетрясения можно получить, если положить, что вся поверхность Σ , содержащая подвижку, является системой пар сил.

В работе [29] дислокации Вольтерра были рассмотрены в упругом полупространстве и получено выражение для компонентов вектора перемещения через интеграл по поверхности подвижки. Выраженный через решения Миндлина этот интеграл имеет следующий вид:

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_j^n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) v_k \right] d\Sigma, \quad (26)$$

где Δu_j – компоненты вектора подвижки; $\mathbf{v}$ – вектор нормали к поверхности подвижки Σ ; ξ_i – координаты точки приложения сил; производные вида $\frac{\partial u_p}{\partial \xi_q}$ – это различные полупространственные ядра деформации Миндлина, определяющие поля перемещений под действием двойных сил (при $p = q$ – без момента): $\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_i^n}$ – центра дилатации (суммирование по $n = 1..3$), а $\frac{\partial u_i}{\partial \xi_i}$ – ядра деформации для двойной силы без момента, $\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right)$ – система двух перпендикулярных пар двойных сил с моментами.

В случае прямоугольного источника с линейными размерами L и W поверхностный интеграл (26), опуская подинтегральное выражение, будет выглядеть следующим образом:

$$\int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta'. \quad (27)$$

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

$$\begin{cases} x \rightarrow x - \xi', \\ y \rightarrow y - \eta' \cdot \cos(\delta), \\ c \rightarrow c - \eta' \cdot \sin(\delta), \end{cases} \quad (28)$$

где δ – угол падения.

Для упрощения интегрирования введем еще ряд подстановок:

$$\begin{cases} x - \xi' = \xi, \\ p - \eta' = \eta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x \rightarrow \xi, \\ y \rightarrow \eta \cdot \cos(\delta) + q \cdot \sin(\delta), \\ d \rightarrow \eta \cdot \sin(\delta) - q \cdot \cos(\delta), \\ p \rightarrow \eta. \end{cases} \quad (29)$$

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

Тогда интеграл (27) будет выражен в виде:

$$\int_x^{x-L} d\xi \int_p^{p-W} d\eta \quad (30)$$

Используя системы сил для получения силового эквивалента разрыва смещений по простиранию и падению как в работе [30] и выражение (26), будем получать аналитические выражения для расчета поля перемещений. Перейти от перемещений к напряжениям и деформациям можно при помощи выражений (2) и (3).

4. Численное моделирование

Расчет производился на поверхности $z = 0$, параметры упругого полупространства были выбраны следующие: коэффициенты Ламэ $\lambda = \mu = 3.675 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$.

Интенсивность двойных сил в случае точечного источника определяется тензором сейсмического момента конкретного землетрясения. Размеры прямоугольной площадки в случае распределенного источника определяются по аналогии с работой [19]: для длины L и ширины W : $\log(L) = 0.5M_w - 1.85$, $\log(W) = 0.5M_w - 2.25$, $M_w = 2/3 \cdot \log(M_0) - 10.7$ – моментная магнитуда, M_0 – скалярный сейсмический момент. Величина подвижки $U = M_0/(\mu \cdot S)$, S – площадь дислокации. Компоненты подвижки по простиранию и падению определяются по ее величине U с учетом уклона (slip).

Все параметры землетрясений были взяты из каталога механизмов очагов землетрясений CMT (<https://www.globalcmt.org/>).

Пространственное распределения зон относительных сдвиговых деформаций свободной поверхности определяются компонентом ϵ_{xy} тензора деформаций.

Результаты моделирования представлены на рис. 2 – 5. На каждом рисунке под буквой (а) – зоны относительных сдвиговых деформаций на свободной поверхности, вызванных действием точечного источника в виде единичной силы, (б) – точечного источника в виде комбинации девяти пар двойных сил, (в) – распределенного источника в виде прямоугольной площадки.

Рис. 2. Области относительных сдвиговых деформаций свободной поверхности, смоделированных для землетрясения с $M_w = 4.8$, произошедшего 24.12.2018 г. в 13:21:39 UT. Глубина гипоцентра – 17.2 км, координаты эпицентра – 54.73° с.ш. 164.55° в.д.

Видно, что деформации на поверхности $z = 0$, определяемые точечным источником в виде девяти пар двойных сил (рис. 2б – 5б) и распределенным источником (рис. 2в – 5в) обладают более сложным пространственным распределением, чем деформации, возникающие под действием точечного источника в виде единичной силы (рис. 2а – 5а). Это позволяет более точно определять уровень относительных сдвиговых деформаций в конкретной точке пространства.

Рис. 3. Области относительных сдвиговых деформаций свободной поверхности, смоделированных для землетрясения с $M_w = 5.1$, произошедшего 25.03.2020 г. в 17:21:45 UT. Глубина гипоцентра – 36.4 км, координаты эпицентра – 49.231° с.ш. 158.132° в.д. (значения уровней деформации см. на рис. 2)

Рис. 4. Области относительных сдвиговых деформаций свободной поверхности, смоделированных для землетрясения с $M_w = 5.1$, произошедшего 07.04.2020 г. в 06:27:21 UT. Глубина гипоцентра – 45.3 км, координаты эпицентра – 49.141° с.ш. 157.819° в.д. (значения уровней деформации см. на рис. 2)

Рис. 5. Области относительных сдвиговых деформаций свободной поверхности, смоделированных для землетрясения с $M_w = 4.8$, произошедшего 13.03.2021 г. в 05:40:08 UT. Глубина гипоцентра – 17.2 км, координаты эпицентра – 54.73° с.ш. 164.55° в.д. (значения уровней деформации см. на рис. 2)

Заключение

Произведено моделирование зон относительных сдвиговых деформаций для четырех камчатских землетрясений с $M_w \geq 4.8$, произошедших в период с декабря 2018 г. по март 2021 г. Для описания очага землетрясения использованы разные модели: точечный источник в виде единичной силы, точечный источник в виде девяти пар сил, распределенный источник в виде прямоугольной площадки.

В результате моделирования показано, что деформации на поверхности $z = 0$, определяемые точечным источником в виде сложной системы сил и распределенным источником обладают более сложным пространственным распределением, чем деформации, возникающие под действием точечного источника в виде единичной силы. По мнению авторов, отличия в пространственном распределении зон повышенных деформаций в случае простой силы по сравнению с двумя другими источниками напряжений объясняются тем, что такая модель силового воздействия, возникающего в очаге землетрясения, является достаточно грубой аппроксимацией и не может точно описывать напряженно-деформированное состояние пород вокруг очага.

Сравнительный анализ результатов моделирования с использованием точечного источника в виде девяти пар сил и распределенного источника в виде прямоугольной площадки показывает, что в некоторых случаях (например, рис. 4) пространственные распределения зон относительных сдвиговых деформаций достаточно близки. В других случаях (например, рис. 3) они различаются. Поэтому в дальнейших исследованиях целесообразно производить сравнение результатов моделирования с результатами натурных наблюдений геоакустической эмиссии, а в качестве модели очага использовать точечный источник в виде сложной системы сил и распределенный источник, как более точно описывающие силовое воздействие, возникающее в очаге землетрясения.

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

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

Благодарность. Авторы выражают благодарность канд. техн. наук Шереметьевой О.В. за консультацию по вопросам математического моделирования.

Список литературы/References

1. Добровольский И.П. *Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения*. Москва: Физматлит, 2009. 240 с. [Dobrovolskiy I.P. *Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya*. Moskva: Fizmatlit, 2009. 240 pp. (In Russian)]
2. Райс Дж. *Механика очага землетрясения / Механика. Новое в зарубежной науке*. Москва: Мир, 1982. 122 с. [Rice J. *The mechanism of earthquake rupture*. Bologna: Physics of the Earth's Interior, 1980. 96 pp.]
3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. Москва: Наука, 2003. 270 с. [Sobolev G.A., Ponomarev A.V. *Fizika zemletryaseniy i predvestniki*. Moskva: Nauka, 2003. 270 pp. (In Russian)]
4. Сидорин А.Я. *Предвестники землетрясений*. Москва: Наука, 1992. 192 с. [Sidorin A. YA. *Predvestniki zemletryaseniy*. Moskva: Nauka, 1992. 192 pp. (In Russian)]
5. Соболев Г. А. *Основы прогноза землетрясений*. Москва: Наука, 1993. 313 с. [Sobolev G. A. *Osnovy prognoza zemletryaseniy*. Moskva: Nauka, 1993. 313 pp. (In Russian)]

6. Cicerone R.D. et al. A systematic compilation of earthquake precursors // *Tectonophysics*, 2009. vol. 476, pp. 371-396.
7. Добровольский И.П. и др. *Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений. Моделирование предвестников землетрясений*. Москва: Наука, 1980. 33 с. [Dobrovolskiy I.P. i dr. *Ob otsenke razmerov zony proyavleniya predvestnikov zemletryaseniyy. Modelirovaniye predvestnikov zemletryaseniyy*. Moskva: Nauka, 1980. 33 pp. (In Russian)]
8. Алексеев А.С. и др. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // *Вычислительная сейсмология*, 2001. Т. 32, С. 81-97. [Alekseyev A.S. i dr. O kontseptsii mnogodistsiplinarnogo prognoza zemletryaseniyy s ispol'zovaniyem integral'nogo predvestnika // *Vychislitel'naya seysmologiya*, 2001. vol. 32, pp. 81-97 (In Russian)].
9. Моргунов В.А. и др. Геоакустический предвестник Спитакского землетрясения // *Вулканология и сейсмология*, 1991. Т. 4, С. 104-106. [Morgunov V.A. i dr. Geoakusticheskiy predvestnik Spitakskogo zemletryaseniya // *Vulkanologiya i seysmologiya*, 1991. vol. 4, pp. 104-106 (In Russian)].
10. Gregori G.P. et al. «Storms of crustal stress» and AE earthquake precursors // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010. vol. 10, pp. 319-337.
11. Купцов А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке // *Физика Земли*, 2005. Т. 10, № 41, С. 59-65. [Kuptsov A.V. Izmeneniye kharaktera geoakusticheskoy emissii v svyazi s zemletryaseniym na Kamchatke // *Fizika Zemli*, 2005. vol. 10, no. 41, pp. 59-65 (In Russian)].
12. Марапулец Ю.В. Высокочастотный акустоэмиссионный эффект // *Вестник КРАУНЦ. Физ.мат. науки*, 2015. Т. 1, № 10, С. 44-53. [Marapulets YU.V. Vysokochastotnyy akustoemissionnyy efekt // *Vestnik KRAUNTS. Fiz.mat. nauki*, 2015. vol. 1, no. 10, pp. 44-53 (In Russian)].
13. Салтыков В.А. и др. Вариации приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума в результате изменений напряженного состояния среды // *Вулканология и сейсмология*, 1997. Т. 3, С. 73-83. [Saltykov V.A. i dr. Variatsii prilivnoy komponenty vysokochastotnogo seysmicheskogo shuma v rezul'tate izmeneniy napryazhennogo sostoyaniya sredy // *Vulkanologiya i seysmologiya*, 1997. vol. 3, pp. 73-83 (In Russian)].
14. Гаврилов В.А. и др. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // *Вулканология и сейсмология*, 2006. Т. 1, С. 52-67. [Gavrilov V.A. i dr. Variatsii urovnya geoakusticheskoy emissii v glubokoy skvazhine G-1 (Kamchatka) i ikh svyaz' s seysmicheskoy aktivnost'yu // *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2006. vol. 1, pp. 52-67 (In Russian)].
15. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия*. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с. [Marapulets YU.V., Shevtsov B.M. *Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya*. Vladivostok: Dal'nauka, 2012. 126 pp. (In Russian)]
16. Водинчар Г. М., Пережогин А. С., Сагитова Р. Н., Шевцов Б. М. Моделирование зон геоакустической эмиссии // *Математическое моделирование*, 2007. Т. 19, № 11, С. 59-64. [Vodinchar G. M., Perezhogin A. S., Sagitova R. N., Shevtsov B. M. Modelirovaniye zon geoakusticheskoy emissii // *Matematicheskoye modelirovaniye*, 2007. vol. 19, no. 11, pp. 59-64 (In Russian)].
17. 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. [Perezhogin A.S., Shevtsov B.M. Modeli napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornyykh porod pri podgotovke zemletryaseniyy i ikh svyaz' s geoakusticheskimi nablyudeniymi // *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2009. vol. 14, no. 3, pp. 48-57 (In Russian)].
18. Пережогин А.С. О зонах геоакустической эмиссии в упругом приближении среды // *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*, 2009. Т. 13, № 1, С. 198-201. [Perezhogin A.S. O zonakh geoakusticheskoy emissii v uprugom priblizhenii sredy // *Vestnik KRAUNTS. Nauki o zemle*, 2009. vol. 13, no. 1, pp. 198-201 (In Russian)].
19. 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. [Saltykov V.A., Kugayenko YU.A. Razvitiye pripoverkhnostnykh zon dilatansii kak vozmozhnaya prichina anomalii v parametrah seismicheskoy emissii pered sil'nymi zemletryaseniymi // *Tikhookeanskaya geologiya*, 2012. vol. 31, no. 1, pp. 96-106 (In Russian)].
20. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология: Теория и методы*, Т. 1. Москва: МИР, 1983. 520 с. [Aki K., Richards P. *Kolichestvennaya seysmologiya: Teoriya i metody*, vol. 1. Moskva: MIR, 1983. 520 pp. (In Russian)]

21. Sato R., Matsu'ura M. Strains and tilts on the surface of a semi-infinity medium // *Journal of Physics of the Earth*, 1974. vol. 22, no. 2, pp. 213-221.
22. Sato R. Crustal Deformation due to Dislocation in a Multy-layered Medium // *Journal of Physics of the Earth*, 1971. vol. 19, no. 1, pp. 31-46.
23. 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.
24. Liu T. et al. Co-seismic internal deformations in a spherical layered Earth mode // *Geophysical Journal International*, 2020. vol. 208, no. 3, pp. 1515-1531.
25. Новацкий В. *Теория упругости*. Москва: МИР, 1975. 872 с. [Novatskiy V. *Teoriya uprugosti*. Moskva: MIR, 1975. 872 pp. (In Russian)]
26. Mindlin R. Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinity Solid // *Journal of Applied Physics*, 1936. vol. 7, pp. 195-202.
27. Mindlin R., Cheng D. Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid // *Journal of Applied Physics*, 1950. vol. 21, pp. 926-930.
28. Воронина Е.В. *Механика очага землетрясения. Спецкурс*. Москва: Физический факультет МГУ, 2004. 92 с. [Voronina Ye.V. *Mekhanika ochaga zemletryaseniya. Spetskurs*. Moskva: Fizicheskiy fakul'tet MGU, 2004. 92 pp. (In Russian)]
29. Steketee J.A. On Volterra's dislocations in a semi-infinity elastic medium // *Canadian Journal of Physics*, 1958. vol. 36, no. 2, pp. 192-205.
30. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bulleten of the Seismological Society of America*, 1992. vol. 82, no. 2, pp. 1018-1040.

MATHEMATICAL MODELING

MSC 86-10

Research Article

Modeling of relative shear deformation zones before strong earthquakes in Kamchatka from 2018-2021

M. I. Gapeev^{1,2}, Yu. V. Marapulets¹

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

² Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Kamchatka region, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: gm16493@gmail.com

We present a comparative modeling of the zones of relative shear deformation for four Kamchatka earthquakes $M_w \geq 4.8$ that occurred between December 2018 and March 2021. Modeling based on a static model of the deformation field in the framework of the theory of elasticity. The Earth's crust is considered as a homogeneous isotropic elastic half-space, in which there are different sources of stress describing the source of the earthquake: a point source in the form of a single force, a point source in the form of a combination of nine double forces, a distributed source in the form of a rectangular area.

Keywords: stress-strain state of the Earth's crust, relative shear deformations, earthquake source model, zones of increased deformations.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66

Original article submitted: 15.11.2021

Revision submitted: 11.12.2021

For citation. 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

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., Marapulets Yu. V., 2021

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