



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ ПО GPS-ДАННЫМ

Лариса Алексеевна Назарова¹, Леонид Анатольевич Назаров², ✉

^{1,2}Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия,

¹larisa.a.nazarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3712-2939>

²mining1957@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9857-295X>

Аннотация. Исследование, проведенное в рамках проблемы прогноза землетрясений, посвящено теоретическому обоснованию подхода для определения параметров очага по результатам спутникового мониторинга смещений земной поверхности в регионах с повышенной сейсмичностью. На основе 2D и 3D геомеханических моделей, трактующих земную кору как упругое полупространство, и представлении об очаге землетрясения как сосредоточенном источнике типа «двойная сила» сформулированы обратные коэффициентные задачи поиска координат гипоцентра и компонент силы по деформациям свободной поверхности, рассчитанным по данным спутниковой геодезии. Численными экспериментами с использованием синтетических данных установлена разрешимость обратных задач.

Ключевые слова: массив горных пород, землетрясение, фокальные параметры, GPS-данные, геомеханическая модель, деформация, обратная задача

Финансирование: работа выполнена в рамках бюджетного проекта НИР ИГД СО РАН (номер государственной регистрации 124020700085-5).

Для цитирования: Назарова Л.А., Назаров Л.А. Определение параметров очага сейсмического события по GPS-данным // Геофизические технологии. 2026. № 1. С. 6–15. doi:10.18303/2619-1563-2026-1-6.

DETERMINING THE PARAMETERS OF A SEISMIC EVENT SOURCE USING GPS DATA

Larisa A. Nazarova¹, Leonid A. Nazarov², ✉

^{1,2}Chinakal Institute of Mining, SB RAS, Krasny Ave., 54, Novosibirsk, 630091, Russia

¹larisa.a.nazarova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3712-2939>

²mining1957@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9857-295X>

Abstract. This study, conducted within the context of earthquake prediction, is devoted to the theoretical justification of an approach for determining focal parameters based on satellite monitoring of ground displacements in regions with increased seismicity. Based on 2D and 3D geomechanical models treating the Earth's crust as an elastic half-space and the concept of an earthquake focus as a point "double-force" source, inverse coefficient problems are formulated for finding the hypocenter coordinates and force components based on daylight surface strains calculated from satellite geodesy data. Numerical experiments using synthetic data establish the solvability of the inverse problems.

Keywords: rock mass, earthquake, focal parameters, GPS data, geomechanical model, strain, inverse problem

Funding: the work was supported by budgetary research project of the Institute of Mining SB RAS (state registration number 124020700085-5).

For citation: Nazarova L.A., Nazarov L.A. Determining the parameters of a seismic event source using GPS data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2026. No. 1. P. 6–15. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2026-1-6.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение причин землетрясений и создание физической теории их подготовки, установление пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса, оценка влияния природных и техногенных динамических событий на территорию размещения промышленных и гражданских объектов (сейсмическое районирование), построение скоростных разрезов для получения структуры геологической среды – вот далеко неполный перечень проблем количественной сейсмологии [Aki, Richards, 2002; Ammon et al., 2021]. К последним относится определение фокальных параметров землетрясения, осуществляемое посредством ретроспективного анализа сейсмограмм статистическими методами [Соболев, Пономарев, 2003; Baker et al., 2022]. Прогноз динамических событий в массиве горных пород, в том числе и землетрясений – более сложная задача, решение которой невозможно без существования действенных предвестников, которые могут быть зарегистрированы инструментально и/или выявлены в результате обработки и интерпретации длинных рядов наблюдений параметров геодинамических и геофизических процессов. В работе [Пулинец и др., 2014] выделено 17 таких предвестников, первый из них – деформации дневной поверхности в окрестности эпицентральной зоны перед землетрясениями, регистрируемые с помощью GPS и InSAR-технологий. В результате многочисленных лабораторных экспериментов [Кочарян, 2016] и натурных наблюдений [Scholz et al., 1973] поведения геосреды в окрестности нарушений сплошности различного масштабного уровня (от трещин в образцах до межплитных тектонических разломов) установлено, что динамическому срыву разлома предшествует фаза медленного скольжения (подготовка землетрясения), которая и обуславливает вариацию параметров геофизических полей – предвестников. В частности, анализ горизонтальных движений [Пупатенко, 2019; Bletery, Nosquet, 2023] и деформаций [Pollitz, 1996; Назарова, Назаров, 2009] дневной поверхности показал резкое возрастание их амплитуды в эпицентральной области непосредственно перед сильными землетрясениями.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны деформации на юге Западной Сибири, рассчитанные по GPS-данным [Гольдин и др., 2004], которые зарегистрированы в 2000–2003 гг. до Алтайского землетрясения (27.09.2003, $M = 7.5$): в окрестности эпицентра землетрясения (показан кружком) деформации в несколько раз больше, чем на прилежащих территориях.

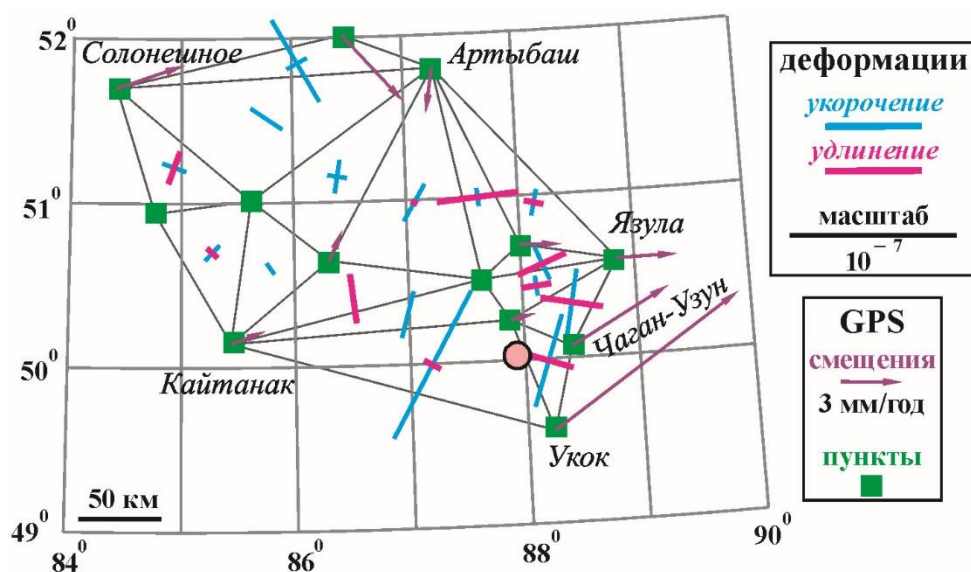


Рис. 1. Деформации земной поверхности юга Западной Сибири, рассчитанные по GPS-данным за 2000–2003 гг.

Развитие методов и технических средств космической геодезии, увеличение количества спутников группировки GPS и повышение точности портативных GPS-приемников способствует быстрому накоплению данных о смещениях на поверхности Земли, что создает новые возможности для мониторинга землетрясений [Бондур, Смирнов, 2005; Сдельникова, Стеблов, 2016; Ohta et al., 2018; Тимофеев и др., 2024] и выявления их предвестников [Burgmann, 2023; Калинин и др., 2025].

В настоящей работе в рамках геомеханической модели, описывающей квазистатическое деформирование структурно-неоднородного породного массива, обоснована возможность количественной оценки параметров сосредоточенного источника, имитирующего действие расположенного на нарушении сплошности аномального участка (рассматриваемого в качестве аналога очаговой зоны готовящегося землетрясения), на основе решения коэффициентной обратной задачи по GPS-данным.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И СИЛЫ ЗАГЛУБЛЕННОГО ИСТОЧНИКА ПО ДЕФОРМАЦИЯМ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для анализа реакции геосреды на квазистатические изменения в очаговых зонах при подготовке землетрясений в монографии [Николаевский, 2010] предложено использовать функцию дилатансии:

$$T = \tau_{max} - \tau_*,$$

где τ_{max} – максимальное касательное напряжение, $\tau_* = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C$ (σ_n – нормальное напряжение на площадке действия τ_{max} , φ – угол внутреннего трения, C – сцепление).

Плоская модель. Рассматривая одну из простейших моделей очага землетрясения – сосредоточенная сила $\vec{F} = (F_x, F_z)$ в однородном упругом полупространстве [Aki, Richards, 2002], в работе [Алексеев и др., 1998] с использованием результатов [Mindlin, Cheng, 1950] исследованы размеры и форма областей дилатансии $T > 0$ при различных параметрах очаговой зоны и прочностных свойствах среды φ и C .

На рисунке 2 представлена постановка задачи [Mindlin, Cheng, 1950]: сила \vec{F} приложена в точке (x_0, z_0) однородной невесомой упругой полуплоскости, граница которой $z = 0$ свободна от напряжений

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zz} = 0. \quad (1)$$

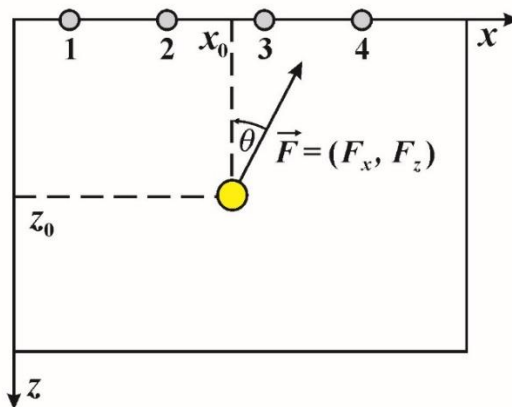


Рис. 2. Постановка задачи о действии точечного источника в упругой полуплоскости.

Напряженно-деформированное состояние среды описывается системой, включающей:
 уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad (2)$$

закон Гука

$$\sigma_{ij} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz})\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

соотношения Коши

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (4)$$

где σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j = x, z$), по повторяющимся индексам производится суммирование, u_i – смещения, λ и μ – параметры Ламе.

Обозначим $\sigma_{ij}^0(x, z)$ аналитическое решение системы (1) – (4) для сосредоточенной силы [Mindlin, Cheng, 1950], при этом на свободной границе отлична от нуля только компонента

$$\sigma_{xx}^0(x, 0) = \frac{2(x - x_0)F_x + z_0F_z}{\pi(x - x_0)^2 + z_0^2}. \quad (5)$$

Рассмотрим, в отличие от [Алексеев и др., 1998], весомую полуплоскость, добавляя к σ_{ij}^0 внешние (природные) напряжения:

$$\sigma_{xx}^e(x, z) = q_h\sigma_V(z), \quad \sigma_{xz}^e(x, z) = 0, \quad \sigma_{zz}^e(x, z) = \sigma_V(z),$$

где $\sigma_V(z) = \rho gz$ – литостатическое напряжение, ρ – плотность пород, q_h – коэффициент бокового отпора.

На рисунке 3 представлены области дилатансии, рассчитанные по суммарным напряжениям $\sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^e$ при сбросовом геодинамическом режиме ($q_h = 0.4$) и различной ориентации \vec{F} . Можно видеть, что для определенных соотношений прочностных свойств среды, параметров очаговой зоны и внешнего поля напряжений эти области достигают дневной поверхности (являясь, по-видимому, причиной возрастания амплитуды смещений) и могут быть обнаружены методами спутниковой геодезии. Отметим, что зоны дилатансии максимальные, если сила \vec{F} направлена вертикально вверх ($\theta = 0$).

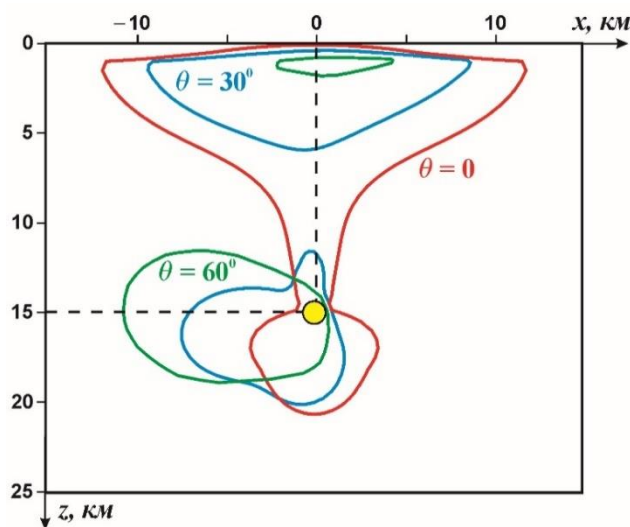


Рис. 3. Области дилатансии при $|\vec{F}|=10^7$ МН/м, $\varphi = 40^\circ$, $C = 30$ МПа, $\rho = 2700$ кг/м³, $z_0 = 15$ км и различных углах θ .

Технологии GPS и InSAR позволяют получить подробные данные о деформациях ε_{ij} в окрестности земной поверхности, которые, в свою очередь, несут информацию о геодинамических процессах в литосфере. Покажем принципиальную возможность количественной оценки параметров этих процессов по ε_{ij} , а именно, характеристик готовящегося землетрясения.

Пусть на дневной поверхности (см. рис. 2) в четырех равноотстоящих пунктах с координатами $(x_l, 0)$, $x_l = x_1 + (l - 1)h$ ($l = 1, 2, 3, 4$) зарегистрированы горизонтальные деформации ε_{xx}^l . Из (1) и (3) следует, что для плоского деформированного состояния при $z = 0$

$$\sigma_{xx} = \omega \varepsilon_{xx},$$

где $\omega = 4\mu(\lambda + \mu)/(2\lambda + \mu)$. Тогда с учетом (5) получим систему нелинейных уравнений:

$$s_l = \frac{(x_l - x_0)F_x + z_0F_z}{(x_l - x_0)^2 + z_0^2}, \quad s_l = 0.5\pi\omega\varepsilon_{xx}^l, \quad (6)$$

относительно четырех неизвестных: координат очага (x_0, z_0) и компонент вектора силы (F_x, F_z) . Таким образом, сформулирована обратная коэффициентная задача определения фокальных параметров готовящегося сейсмического события по зарегистрированным на свободной поверхности деформациям.

Система (6) имеет аналитическое решение, в частности,

$$F_x = \frac{2h^2(c_1 - c_2)}{(a_{23} - a_{34})c_1 - (a_{12} - a_{23})c_2},$$

$c_1 = b_{12} - b_{23}$, $c_2 = b_{23} - b_{34}$, $b_{lm} = 1/s_l - 1/s_m$, $a_{lm} = x_l/s_l - x_m/s_m$, $m = 2, 3, 4$. Выражения для остальных неизвестных не приводятся из-за их крайней громоздкости, необходимо лишь отметить, что в рассмотренном случае координаты очага не зависят от упругих свойств среды λ и μ .

Объемная модель. Сформулируем аналогичную задачу в трехмерной постановке, но в качестве очага готовящегося землетрясения будем рассматривать небольшую зону с аномальными свойствами, расположенную на нарушении сплошности (тектоническом разломе). Выберем расчетную область G в виде параллелепипеда с размерами $X = 30$, $Y = 50$ и $Z = 20$ км по соответствующим осям декартовой системы координат (x, y, z) (рис. 4), где расположен тонкий слой J мощностью Δ , имитирующий тектоническое нарушение (α и β – углы простираия и падения). Ось z вертикальна, оси x и y параллельны главным горизонтальным напряжениям σ_h и σ_H в природном поле, которые характеризуются коэффициентами бокового отпора q_h и q_H соответственно [Назарова, 1999].

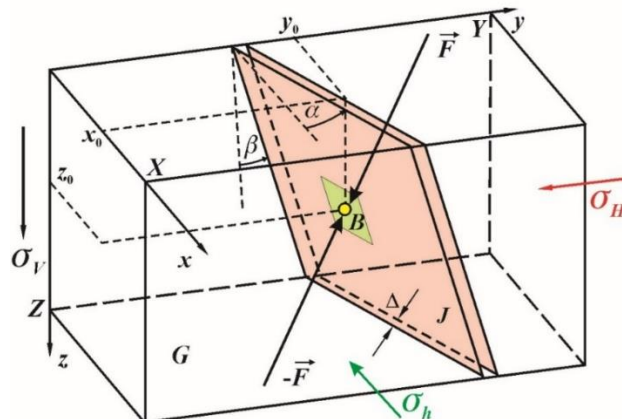


Рис. 4. Область расчета G и модель эквивалентного источника.

Подготовка сейсмического события [Добровольский, 2009; Кочарян, 2016] начинается, как правило, с возникновения на J зоны концентрации напряжений B (рис. 4) (например, вследствие зацепления берегов разлома на локальных неоднородностях). По этой причине в геосреде в процессе медленных тектонических движений в окрестности зоны B происходят изменения полей смещений и деформаций, «следы» которых и регистрируют на дневной поверхности методами спутниковой геодезии.

На границе области G зададим следующие условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(x, y, 0) = \sigma_{yz}(x, y, 0) = \sigma_{zz}(x, y, 0) = 0, \quad u_z(x, y, Z) = 0, \\ \sigma_{xx}(0, y, z) = \sigma_{xx}(X, y, z) = q_h \sigma_V(z), \\ \sigma_{yy}(x, 0, z) = \sigma_{yy}(x, Y, z) = q_H \sigma_V(z), \end{aligned} \quad (7)$$

касательные напряжения всюду на ∂G отсутствуют. Зона B моделировалась участком 1×1 км (см. рис. 4) с центром в точке с координатами $x_0 = 15$, $y_0 = 25$ и $z_0 = 5$ км с повышенными деформационными свойствами (касательная жесткость разлома в B больше чем в остальной части J в f раз). Система (2), (3), (4), (7) решалась методом конечных элементов с использованием оригинального кода [Назарова, 1995]. В результате при задаваемых типичных физических свойствах среды на свободной поверхности рассчитывалось распределение деформаций $\varepsilon_{ij}^0(x, y) = \varepsilon_{ij}(x, y, 0)$ ($i, j = x, y$).

Можно ли теперь решить обратную задачу: по ε_{ij}^0 найти параметры (размеры, положение и свойства, например, величину f) аномальной зоны B ? Из принципа Сен-Венана [Работнов, 1979] следует, что на расстояниях порядка нескольких характерных линейных размеров области приложения системы сил поля напряжений и деформаций зависят только от главного вектора и главного момента этой системы, поэтому определить параметры B по ε_{ij}^0 невозможно. В этой связи будем искать эквивалентный точечный источник типа «двойная сила» [Аки, Richards, 2002], генерирующий на свободной поверхности $z = 0$ деформации ε_{ij} , близкие к ε_{ij}^0 в известном дискретном множестве точек M (соответствует области, где проводились измерения методами спутниковой геодезии). Для этого введем целевую функцию:

$$\Psi(\Pi) = \sum_{i,j=x,y} \sum_{(x,y) \in M} \gamma_{ij} [1 - \varepsilon_{ij}(\Pi, x, y, 0) / \varepsilon_{ij}^0(x, y)]^2, \quad (8)$$

$\Pi = \{F_x, F_y, F_z, x_s, y_s, z_s\}$, $\varepsilon_{ij}(\Pi, x, y, 0)$ – теоретические деформации, рассчитанные по (2), (3), (4), (7) при некотором наборе Π аргументов Ψ ; F_x, F_y и F_z компоненты сосредоточенной силы \vec{F} , приложенной в точке (x_s, y_s, z_s) ; γ_{ij} – весовые коэффициенты. Минимум Ψ , доставляющий решение Π^* поставленной задачи, отыскивался модифицированным методом сопряженных градиентов [Назаров и др., 2012].

Входные данные, деформации ε_{ij}^0 , вычислялись при следующих значениях параметров модели: $\lambda = \mu = 30$ Гпа, $\alpha = 0$, $\beta = 15^\circ$, $q_h = 0.35$, $q_H = 0.6$ (сбросовый геодинамический режим), $\Delta = 0.1$ км, $\rho = 2700$ кг/м³, $f = 1.05$. Рисунок 5, а демонстрирует результат таких вычислений – линии уровня горизонтальной деформации $\varepsilon_{xx}^0(x, y, 0)$ на свободной поверхности.

Для набора весовых коэффициентов $\gamma_{xx} = \gamma_{yy} = 0$, $\gamma_{xy} = 1$ минимум целевой функции (8) достигается при $F_x^* = 0$, $F_y^* = 0.6 \cdot 10^7$ МН/м, $F_z^* = 0.9 \cdot 10^7$ МН/м, $x_s^* = 15$, $y_s^* = 25$ и $z_s^* = 5$ км. На рисунке 5, б показаны изолинии ε_{xx} , рассчитанные при $\Pi = \Pi^*$. Хотя параметры эквивалентного источника отыскивались только по данным о сдвиговых деформациях ε_{xy}^0 , необходимо отметить хорошую сходимость ε_{ij}^0 с $\varepsilon_{ij}(\Pi^*, x, y, 0)$ и совпадение точки приложения силы с центром аномальной зоны.

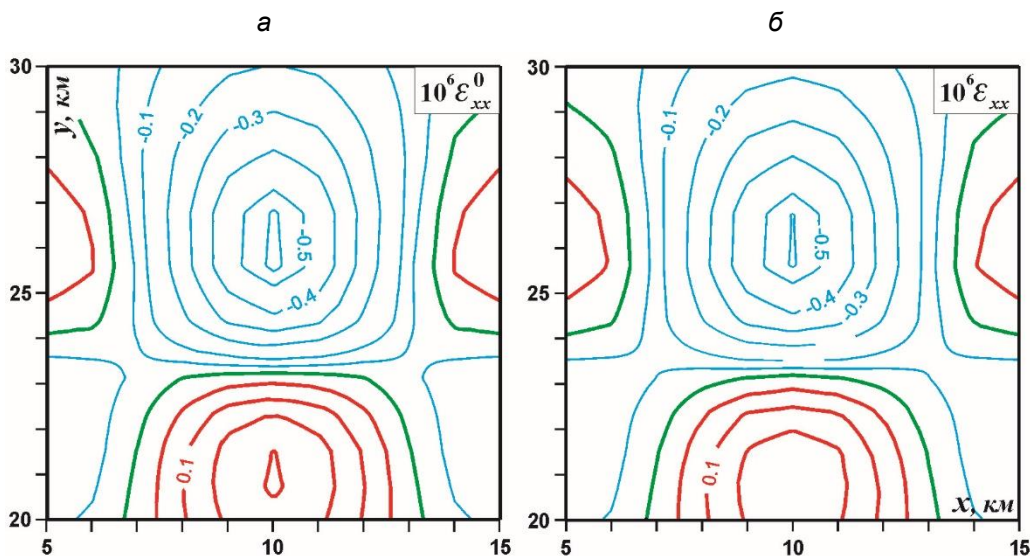


Рис. 5. Горизонтальные деформации ε_{xx}^0 на свободной поверхности, обусловленные аномальной зоной B (а); распределение деформаций ε_{xx} при действии эквивалентного источника (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В контексте проблемы прогноза природных катастрофических событий теоретически обоснован подход к количественной оценке энергетических характеристик и местоположения очаговой зоны готовящегося динамического явления по аномалиям полей деформаций на поверхности Земли, которые регистрируются методами спутниковой геодезии. Трактую аномальную область как эпицентральную предстоящего землетрясения, разработана и методом конечных элементов реализована соответствующая объемная геомеханическая модель верхней части земной коры, содержащая крутопадающий тектонический разлом с небольшим участком с повышенными деформационно-прочностными свойствами, который и рассматривался как причина возникновения поверхностной аномалии. В рамках построенной модели массива горных пород и концепции эквивалентного точечного источника (пара сил, имитирующая очаг) сформулирована обратная коэффициентная задача: определить координаты гипоцентра и компоненты сил, входной информацией для которой служат деформации дневной поверхности (рассчитываемые, как правило, по GPS и/или InSAR-данным мониторинга сейсмоактивных территорий). Численными экспериментами с использованием синтетических данных показана однозначная разрешимость обратной задачи и возможность заблаговременной локализации места и оценки фокальных характеристик предстоящего землетрясения.

Дальнейшие исследования необходимо проводить с использованием реальных данных спутниковых наблюдений в сейсмоопасных регионах с хорошо изученным геологическим строением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. Определение интегрального предвестника землетрясений с использованием многодисциплинарной модели и активного вибросейсмического мониторинга // Математическое моделирование в геофизике: Труды ИВМиМГ. Новосибирск: ИВМиМГ, 1998. С. 3–50.

Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады академии наук. 2005. Т. 402, № 5.

С. 675–679. EDN:HSJYJH.

Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Т. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Доклады академии наук. 2005. Т. 405, № 6. С. 804–809. EDN:HSKBHV.

Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с. EDN:MUWSCF.

Калинчук В.В., Шестопалов В.Л., Шестопалов П.В., Шереметьев В.М. Исследование механического предвестника корового землетрясения с использованием GPS-измерений // Наука Юга России. 2025. Т. 21, № 1. С. 6–10. doi:10.7868/S25000640250101. EDN:PVHNDR.

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с. EDN:YVWLRV.

Назарова Л.А. Моделирование объемных полей напряжений в разломных зонах земной коры // Доклады академии наук. 1995. Т. 342, № 6. С. 804–808.

Назарова Л.А. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 1. С. 28–36. EDN:MPEDZP.

Назарова Л.А., Назаров Л.А. Метод определения параметров очага готовящегося землетрясения на основе данных о смещениях дневной поверхности // Доклады академии наук. 2009. Т. 427, № 4. С. 534–538. EDN:KPTVBD.

Назаров Л.А., Назарова Л.А., Карчевский А.Л., Панов А.В. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах // Сибирский журнал индустриальной математики. 2012. Т. XV, № 4. С. 102–109. EDN:PIWSKV.

Николаевский В.Н. Геомеханика: собрание трудов в 2-х томах. Том 2. Земная кора. Нелинейная сейсмика. Вихри и ураганы. Ижевск: Изд-во «ИКИ», 2010. 560 с.

Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин С.А., Цадиковский Е.И. Прогноз землетрясений возможен?! М.: Тривант, 2014. 144 с.

Пупатенко В.В. Точность оперативного определения по ГНСС-данным статических смещений, вызванных землетрясениями // Успехи современного естествознания. 2019. № 3. С. 78–83. EDN:ZDJBNZ.

Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии // Геофизические исследования. 2016. Т. 17, № 1. С. 46–55. EDN:VPESAL.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с. EDN:RVEBFL.

Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В. Деформации и смещения земной поверхности в эпоху землетрясений в Турции в феврале 2023 года по геодезическим данным // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 55–72. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55. EDN:FJMJDП.

Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. University Science Books, 2002. 700 p.

Ammon C.J., Velasco A.A., Lay T., Wallace T.C. Earthquake prediction, forecasting, and early warning // Foundations of modern global seismology. Academic Press, 2021. P. 223–248. doi:10.1016/B978-0-12-815679-7.00015-X.

Baker J., Bradley B., Stafford P. Seismic hazard and risk analysis. Cambridge University Press, 2022. 600 p. doi:10.1017/9781108425056.

- Bletery Q., Nocquet J.M.** The precursory phase of large earthquakes // *Science*. 2023. Vol. 381 (6655). P. 297–301. doi:10.1126/science.adg2565.
- Burgmann R.** Reliable earthquake precursors? // *Science*. 2023. Vol. 381 (6655). P. 266–267. doi:10.1126/science.adi8032.
- Mindlin R., Cheng D.** Nuclei of strain in the semi-infinite solid // *Journal of Applied Physics*. 1950. Vol. 21 (9). P. 926–930. doi:10.1063/1.1699785.
- Ohta Y., Inoue T., Koshimura S., Kawamoto S., Hino R.** Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting // *Journal of Disaster Research*. 2018. Vol. 13 (3). P. 453–459. doi:10.20965/jdr.2018.p0453.
- Pollitz F.F.** Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophysical Journal International*. 1996. Vol. 125 (1). P. 1–14. doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.** Earthquake prediction: a physical basis // *Science*. 1973. Vol. 181 (4102). P. 803–810. doi:10.1126/science.181.4102.803.

REFERENCES

- Aki K., Richards P.G.** Quantitative seismology. University Science Books, 2002. 700 p.
- Alekseev A.S., Belonosov A.S., Petrenko B.E.** Determination of the integral precursor of earthquakes using a multidisciplinary model and active vibroseismic monitoring // *Mathematical Modeling in Geophysics*. Novosibirsk: Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, 1998. P. 3–50. (In Russ.).
- Ammon C.J., Velasco A.A., Lay T., Wallace T.C.** Earthquake prediction, forecasting, and early warning // *Foundations of modern global seismology*. Academic Press, 2021. P. 223–248. doi:10.1016/B978-0-12-815679-7.00015-X.
- Baker J., Bradley B., Stafford P.** Seismic hazard and risk analysis. Cambridge University Press, 2022. 600 p. doi:10.1017/9781108425056.
- Bletery Q., Nocquet J.M.** The precursory phase of large earthquakes // *Science*. 2023. Vol. 381 (6655). P. 297–301. doi:10.1126/science.adg2565.
- Bondur V.G., Smirnov V.M.** Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 403 (5). P. 736–740. EDN: LJHLVP.
- Burgmann R.** Reliable earthquake precursors? // *Science*. 2023. Vol. 381 (6655). P. 266–267. doi:10.1126/science.adi8032.
- Dobrovolsky I.P.** Mathematical theory of tectonic earthquake preparation and forecasting. FIZMATLIT, Moscow, 2009. 240 p. (In Russ.).
- Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G.** Fields of the Earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai // *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 405 A (9). P. 1408–1413. EDN:LJKWIT.
- Kalinchuk V.V., Shestopalov V.L., Shestopalov P.V., Sheremetyev V.M.** Investigation of the mechanical predictor of crustal earthquakes using GPS measurements // *Science in the South of Russia*. 2025. Vol. 21 (1). P. 6–10. (In Russ.).
- Kocharyan G.G.** Geomechanics of faults. GEOS, Moscow, 2016. 424 p. (In Russ.).
- Mindlin R., Cheng D.** Nuclei of strain in the semi-infinite solid // *Journal of Applied Physics*. 1950. Vol. 21 (9). P. 926–930. doi:10.1063/1.1699785.
- Nazarova L.A.** Modeling of volume stress fields in fault zones of the Earth's crust // *Doklady Akademii Nauk*. 1995. Vol. 342 (6). P. 804–808. (In Russ.).

- Nazarova L.A.** Estimating the stress and strain fields of the Earth's crust on the basis of the seismotectonic data // Journal of Mining Science. 1999. Vol. 35 (1). P. 26–35. doi:10.1007/BF02562442. EDN:KCGTVY.
- Nazarova L.A., Nazarov L.A.** Method for determination of impending earthquake focal parameters based on daylight surface displacement data // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 427 (2). P. 1001–1005. doi:10.1134/S1028334X09060257. EDN:LPKPMU.
- Nazarov L.A., Nazarova L.A., Karchevskii A.L., Panov A.V.** Estimation of stresses and deformation properties of rock masses which is based on the solution of an inverse problem from the measurement data of the free surface displacement // Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2013. Vol. 7 (2). P. 234–240. doi:10.1134/S1990478913020130. EDN:RFHVHH.
- Nikolaevsky V.N.** Geomechanics. Collection of works in 2 Volumes. Vol. 2. Earth's crust. Nonlinear seismics. Whirlwinds and hurricanes. IKI Publishing House, Izhevsk, 2010. 560 p. (In Russ.).
- Ohta Y., Inoue T., Koshimura S., Kawamoto S., Hino R.** Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting // Journal of Disaster Research. 2018. Vol. 13 (3). P. 453–459. doi:10.20965/jdr.2018.p0453.
- Pollitz F.F.** Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical Journal International. 1996. Vol. 125 (1). P. 1–14. doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x.
- Pulinets S.A., Uzunov D.P., Davidenko D.V., Dudkin S.A., Tsadikovskiy E.I.** Is earthquake forecasting possible?! Trovant, Moscow, 2014. 144 p. (In Russ.).
- Pupatenko V.V.** The accuracy of determination of rapid static slip caused by earthquake using GNSS data // Advances in Modern Natural Science. 2019. No. 3. P. 78–83. (In Russ.).
- Rabotnov Yu.N.** Mechanics of deformable solids. Nauka, Moscow, 1979. 744 p. (In Russ.).
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.** Earthquake prediction: a physical basis // Science. 1973. Vol. 181 (4102). P. 803–810. doi:10.1126/science.181.4102.803.
- Sdelnikova I.A., Steblov G.M.** Monitoring of the tsunamigenic earthquakes by means satellite geodesy // Geophysical Research. 2016. Vol. 17 (1). P. 46–55. (In Russ.).
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.** Physics of earthquakes and precursors. Nauka, Moscow, 2003. 270 p. (In Russ.).
- Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V.** Deformation and displacements of Earth's surface in Turkish earthquakes era in February 2023 by geodesy data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 55–72. (In Russ.) doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НАЗАРОВА Лариса Алексеевна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики Института горного дела СО РАН. Основные научные интересы: моделирование геомеханических и газогидродинамических процессов в природных и геотехнических объектах различного масштабного уровня.

НАЗАРОВ Леонид Анатольевич – доктор физико-математических наук, заведующий лаборатории горной информатики Института горного дела СО РАН. Основные научные интересы: диагностика и оценка состояния породных массивов на основе обратного анализа по данным лабораторных экспериментов и натурных наблюдений.

*Статья поступила в редакцию 6 марта 2026 г.,
одобрена после рецензирования 26 марта 2026 г.,
принята к публикации 30 марта 2026 г.*