

УДК 550.34.013.04; 551.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДИЛАТАНСНЫХ СТРУКТУР

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

В. А. Минаев, д.т.н., профессор кафедры специальных информационных технологий МосУ МВД России, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

А. О. Фаддеев, д.т.н., доцент, профессор кафедры экономической безопасности МосУ МВД России, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: faol@mail.ru

В статье представлена математическая модель, предназначенная для оценки сейсмической устойчивости различных по своему геологическому генезису и строению территорий. Целью работы является создание модели, ориентированной на выявление дилатансных структур, являющихся индикатором возможного развития сейсмической неустойчивости геологической среды. Особое внимание уделено количественной переоценке полей напряжений вследствие проявления в геологической среде сосредоточенной силы естественного (землетрясение) или искусственного (наведённая сейсмичность) происхождения. Рассмотрены результаты практической реализации разработанной модели оценки сейсмической устойчивости на примере выявления дилатансных структур в окрестности землетрясения, произошедшего в Турции 6 февраля 2023 года.

Ключевые слова: математическое моделирование, сейсмическая устойчивость, геологическая среда, вертикальный разрез земной коры, дилатансная структура, напряжённо-деформированное состояние, землетрясение, наведённая сейсмичность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-85-128-138

Введение

Разрушительные землетрясения всегда были и остаются грозным «дамокловым мечом», занесённым природой над человеческой цивилизацией [1-4]. Как всегда, внезапно, этот коварный враг вторгается в размеренную жизнь человека, обрушивая на него неисчислимые бедствия и страдания. Февральское землетрясение в Турции в 2023 году – тому прямое подтверждение [5]. Как же отвести беду, как противостоять катастрофическому натиску такой стихии?

Испокон веков служили людям различные предвестники, предупреждающие о надвигающейся опасности.

Внезапно возникающие и быстро развивающиеся метеорологические аномалии, необычное поведение представителей животного мира, ионосферные и другие эффекты, не связанные непосредственно с геологической средой очага подготавливающегося землетрясения [6-9], всё это в определенной мере говорило о приближающейся трагедии. Вот только времени для спасения жизни у людей практически не оставалось – считанные минуты отделяло появление предвестников от первых сейсмических ударов!

Сегодня, к сожалению, ситуация не лучше. Несмотря на разветвлённую сеть сейсмических станций, интервал упреждения катастрофического землетрясения крайне мал – не более 10-15 минут. Причем это характерно только для таких развитых стран, как Япония, США, Канада, в которых сейсмические сети имеют очень высокую плотность [10, 11]. Потому развиваются и совершенствуются методы упреждения крупных сейсмических событий.

В настоящее время наиболее широко используется способ определения сейсмоопасных площадей по пространственно-аномальным величинам таких параметров, как плотность сей-

смогненных разрывов, наклон графика повторяемости землетрясений, число слабых землетрясений в единицу времени в виде затиший, выделившаяся сейсмическая энергия, данные гидрогеодеформационного мониторинга, обеспечивающего измерение объёмных деформаций горных пород до величин $10^{-9} - 10^{-7}$ [3, 4, 12, 13].

В основу всех этих способов заложен один и тот же алгоритм – сбор информации, последующая статистическая обработка материалов и построение прогнозных карт с указанием аномальных площадей с тремя уровнями вероятности возникновения землетрясений: 0,1–0,2; 0,2–0,4; > 0,4 (вероятности рассчитываются для площади 1000 км²).

Развиваемые авторами исследования опасных геодинамических процессов и вызываемых ими рисков методы оценки этих рисков в своей основе базируются на математическом моделировании названных процессов, ставя во главу угла не статистику, а математическую модель [10, 11].

В таком контексте весьма перспективным представляется подход к оценке возможности развития сейсмической неустойчивости, основанный на выявлении в пределах исследуемой территории так называемой дилатансии.

Согласно существующим представлениям дилатансия – это нелинейное разуплотнение упругой геологической среды за счёт образования трещин сдвига вследствие превышения порогового уровня касательных напряжений [9, 14, 15].

Технология количественной оценки геодинамических напряжений как нормальных, так и сдвиговых уже значительно развита в рамках исследований, проводимых авторами, что нашло отражение во многих публикациях по данной тематике [10, 11, 16–19, 20]. Представляется возможным применить разработанную технологию к задачам выявления латеральных и глубинных распространений областей дилатансии и перейти к математическому моделированию дилатантных структур, являющихся индикатором возможного развития сейсмической неустойчивости геологической среды.

Теоретические исследования

Начнём процесс моделирования дилатантных структур с двумерного случая. Для этого вдоль некоторого профильного направления рассмотрим двумерную задачу о напряжённо-деформированном состоянии вертикального разреза упругой геологической среды, на которую оказывается вертикально ориентированное внешнее воздействие [11, 16].

Граничные условия двумерной модели зададим следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_z(x, h) = V(x, h); & \tau_{xz}(x, h) = 0; \\ \tau_{xz}(x, 0) = 0; & \sigma_z(x, 0) = P(x, 0); \end{cases} \quad (1)$$

где σ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ_{xz} – сдвиговые (касательные) напряжения в плоскости XZ; V – распределённое внешнее воздействие на упругий двумерный слой геологической среды на его верхней границе (дневной поверхности); P – распределённое внешнее воздействие на упругий двумерный слой геологической среды на его нижней границе (границе Мохоровичича или границе Мохо); h – толщина двумерного упругого слоя; «0» соответствует нижней границе модели.

Исходя из физических соображений, будем полагать сдвиговые напряжения на верхней и нижней границах равными нулю, что легко объясняется [20].

Поясним, что понимается под распределёнными внешними воздействиями. Воздействие на нижнюю границу упругого двумерного слоя геологической среды обусловлено неоднородностью температурного режима на границе Мохо. Там, где она ближе к дневной (земной) поверхности, величина теплового потока выше, и наоборот, где граница Мохо залегает глубже, там тепловой поток меньше. Вследствие этого на границе Мохо возникает значительный горизонтальный градиент термоупругих деформаций, проявление которых и вызывает распределённое вертикальное внешнее воздействие на нижнюю границу двумерного

упругого слоя геологической среды. Разработанные авторами ранее температурные модели позволяют выполнить численные оценки подобных воздействий [16].

Что касается верхней границы, то по модельным представлениям внешнее воздействие на двумерный упругий слой обусловлено совместным влиянием топографического рельефа местности и вертикальных современных движений земной коры, которые могут быть отслежены по результатам повторного нивелирования.

Кроме того, необходимо владеть информацией о распределении температуры, плотности геологической среды ρ и упругих модулей λ , μ вдоль исследуемого профильного направления вертикального разреза геологической среды, т.е. эта среда изначально предполагается крайне неоднородной. Благодаря тому, что информация о физико-механических характеристиках геологической среды для многих регионов планеты имеется [19], можно выполнить количественные оценки напряжённо-деформированного состояния среды применительно к выбранному региону исследований.

Представим систему уравнений математической модели с использованием граничных условий (1):

$$\begin{cases} \sigma_x^{(k)}(x, z) = \left\{ k^3 [(A + Bz)ch kz + (C + Dz)sh kz] + \frac{(2\lambda + \mu)k^2}{\lambda + \mu} (Bsh kz + Dch kz) \right\} \cos kx, \\ \sigma_z^{(k)}(x, z) = -k^2 \left\{ k [(A + Bz)ch kz + (C + Dz)sh kz] - \frac{\mu}{\lambda + \mu} (Bsh kz + Dch kz) \right\} \cos kx, \\ \tau_{xz}^{(k)}(x, z) = k^2 \left\{ k [(A + Bz)sh kz + (C + Dz)ch kz] + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (Bch kz + Dsh kz) + \frac{S_z^{(k)}}{k^3} \right\} \sin kx, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sigma_x^{(k)}(x, z)$ и $\sigma_z^{(k)}(x, z)$ – k -е частоты разложений в ряд Фурье компонент горизонтальных и вертикальных нормальных напряжений; $\tau_{xz}^{(k)}(x, z)$ – k -я частота разложения в ряд Фурье компоненты сдвиговых напряжений; x – горизонтальная (латеральная) координата; z – вертикальная (глубинная) координата; $S_z^{(k)}$ – k -я частота разложения в ряд Фурье термического воздействия на глубинном уровне z , вычисляемого по соотношению $S_z = (3\lambda_z + 2\mu_z) \times \alpha_T \cdot grad T_z$ (λ_z , μ_z – упругие модули на глубинном уровне z ; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; T_z – температура на глубинном уровне z); k – частота, определяемая по формуле $k = 2\pi n/L$ (n – номер гармоники ряда Фурье; L – длина профиля); A , B , C , D – неизвестные коэффициенты, которые находятся подстановкой соотношений для компонент тензора напряжений в граничные условия вида (1).

Выполняя подстановку соотношений (2) в граничные условия (1), получим:

$$\begin{cases} -k^2 \left\{ k [(A + Bh)ch kh + (C + Dh)sh kh] - \frac{\mu}{\lambda + \mu} (Bsh kh + Dch kh) \right\} \cos kx = V_k \cos kx, \\ k^2 \left\{ k [(A + Bh)sh kh + (C + Dh)ch kh] + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (Bch kh + Dsh kh) + \frac{S_h^{(k)}}{k^3} \right\} \sin kx = 0, \\ k^2 \left(kC + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} B + \frac{S_0^{(k)}}{k^3} \right) \sin kx = 0, \\ -k^2 \left(kA - \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} D \right) \cos kx = P_k \cos kx, \end{cases} \quad (3)$$

где величины λ , μ соответствуют упругим модулям верхней границы геологической среды, а λ_0 и μ_0 – упругим модулям нижней границы; $S_h^{(k)}$ и $S_0^{(k)}$ соответствуют k -м частотам разложения в ряд Фурье термических воздействий на верхней и нижней границах соответственно;

V_k и P_k – k -е частоты разложения в ряд Фурье внешних воздействий на двумерный упругий слой геологической среды на его верхней и нижней границах, соответственно.

Преобразовывая систему уравнений (3), находим:

$$\begin{cases} kA \cdot chkh + \left(kh \cdot chkh - \frac{\mu}{\lambda + \mu} shkh \right) B + kC \cdot shkh + \left(kh \cdot shkh - \frac{\mu}{\lambda + \mu} chkh \right) D = -\frac{V_k}{k^2}, \\ kA \cdot shkh + \left(kh \cdot shkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} chkh \right) B + kC \cdot chkh + \left(kh \cdot chkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} shkh \right) D = -\frac{S_h^{(k)}}{k^3}, \\ kC = -\frac{S_0^{(k)}}{k^3} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} B, \\ kA = -\frac{P_k}{k^2} + \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} D. \end{cases} \quad (4)$$

Подставляя правые части третьего и четвёртого уравнений системы (4) вместо соответствующих выражений в ее первое и второе уравнения, приходим к системе:

$$\begin{cases} \left(-\frac{P_k}{k^2} + \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} D \right) chkh + \left(kh \cdot chkh - \frac{\mu}{\lambda + \mu} shkh \right) B + \left(-\frac{S_0^{(k)}}{k^3} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} B \right) shkh + \\ + \left(kh \cdot shkh - \frac{\mu}{\lambda + \mu} chkh \right) D = -\frac{V_k}{k^2}, \\ \left(-\frac{P_k}{k^2} + \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} D \right) shkh + \left(kh \cdot shkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} chkh \right) B + \left(-\frac{S_0^{(k)}}{k^3} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} B \right) chkh + \\ + \left(kh \cdot chkh + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} shkh \right) D = -\frac{S_h^{(k)}}{k^3}. \end{cases} \quad (5)$$

Раскрывая скобки, группируя соответствующие выражения вокруг неизвестных коэффициентов B и D , выполняя последовательные преобразования, получаем:

$$\begin{cases} \left[kh \cdot chkh - \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} \right) shkh \right] B + \left[kh \cdot shkh + \left(\frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) chkh \right] D = \\ = \frac{1}{k^2} \left(P_k \cdot chkh - V_k + \frac{S_0^{(k)}}{k} shkh \right), \\ \left[kh \cdot shkh + \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} \right) chkh \right] B + \left[kh \cdot chkh + \left(\frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right) shkh \right] D = \\ = \frac{1}{k^2} \left(P_k \cdot shkh - \frac{S_h^{(k)}}{k} + \frac{S_0^{(k)}}{k} chkh \right). \end{cases} \quad (6)$$

Вводя условные обозначения:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0}; & N_2 = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} - \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \\ N_3 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0}; & N_4 = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \end{cases} \quad (7)$$

и, обозначая через $Q = kh \cdot chkh + N_4 shkh$, выразим из второго уравнения системы (6) неизвестный коэффициент D :

$$D = \frac{1}{k^2 Q} \left(P_k \cdot shkh - \frac{S_h^{(k)}}{k} + \frac{S_0^{(k)}}{k} chkh \right) - (kh \cdot shkh + N_3 chkh) \cdot \frac{B}{Q}. \quad (8)$$

Подставляя правую часть выражения (8) с учетом введенных коэффициентов N_1, N_2, N_3 и N_4 из (7) в первое уравнение системы (6), приходим к уравнению с одним неизвестным коэффициентом B :

$$(kh \cdot chkh - N_1 shkh)B + (kh \cdot shkh + N_2 chkh) \cdot \left[\frac{1}{k^2 Q} \left(P_k \cdot shkh - \frac{S_h^{(k)}}{k} + \frac{S_0^{(k)}}{k} chkh \right) - (kh \cdot shkh + N_3 chkh) \cdot \frac{B}{Q} \right] = \frac{1}{k^2} \left(P_k \cdot chkh - V_k + \frac{S_0^{(k)}}{k} shkh \right).$$

Вводя обозначения вида:

$$\{Q_1 = kh \cdot chkh - N_1 shkh, \quad Q_2 = kh \cdot shkh + N_2 chkh, \quad Q_3 = kh \cdot shkh + N_3 chkh,$$

и, полагая, что $G = Q_1 - \frac{Q_2 \cdot Q_3}{Q}$, из последнего выражения находим коэффициент B :

$$B = \frac{1}{k^2 G} \cdot \left[P_k \left(chkh - \frac{Q_2}{Q} shkh \right) - V_k + \frac{S_0^{(k)}}{k} \left(shkh - \frac{Q_2}{Q} chkh \right) + \frac{Q_2}{Q} \cdot \frac{S_h^{(k)}}{k} \right]. \quad (9)$$

Последовательно подставляя выражение (9) в уравнение (8) и третье уравнение системы (4), получаем соотношения для коэффициентов D и C :

$$D = \frac{1}{k^2 Q} \left\{ P_k \left[shkh - \frac{Q_3}{G} \left(chkh - \frac{Q_2}{Q} shkh \right) \right] + \frac{Q_3}{G} \cdot V_k + \frac{S_0^{(k)}}{k} \left[chkh - \frac{Q_3}{G} \left(shkh - \frac{Q_2}{Q} chkh \right) \right] \frac{S_h^{(k)}}{k} \left(1 + \frac{Q_2 \cdot Q_3}{G \cdot Q} \right) \right\}; \quad (10)$$

$$C = -\frac{S_0^{(k)}}{k^4} \left[1 + \frac{\lambda_0}{G(\lambda_0 + \mu_0)} \left(shkh - \frac{Q_2}{Q} chkh \right) \right] - \frac{\lambda_0}{k^3 G(\lambda_0 + \mu_0)} \left[P_k \left(chkh - \frac{Q_2}{Q} shkh \right) - V_k + \frac{Q_2}{Q} \cdot \frac{S_h^{(k)}}{k} \right]. \quad (11)$$

Учитывая выражение (10) в четвертом уравнении системы (4), находим расчётное соотношение для неизвестного коэффициента A :

$$A = \frac{P_k}{k^3} \left\{ \frac{\mu_0}{Q(\lambda_0 + \mu_0)} \left[shkh - \frac{Q_3}{G} \left(chkh - \frac{Q_2}{Q} shkh \right) \right] - 1 \right\} + \frac{\mu_0}{k^3 Q(\lambda_0 + \mu_0)} \cdot \left\{ \frac{Q_3}{G} \cdot V_k + \frac{S_0^{(k)}}{k} \times \left[chkh - \frac{Q_3}{G} \left(shkh - \frac{Q_2}{Q} chkh \right) \right] - \frac{S_h^{(k)}}{k} \left(1 + \frac{Q_2 \cdot Q_3}{G \cdot Q} \right) \right\}. \quad (12)$$

Совместное использование уравнений систем (1), (2) и расчётных выражений (9) – (12) позволяет количественно оценить напряжённо-деформированное состояние, формирующееся вследствие влияния на верхнюю и нижнюю границы двумерного упругого слоя геологической среды вертикально ориентированных внешних по отношению к этой среде воздействий, в любой точке (x, z) вдоль исследуемого профиля земной коры.

Кроме того, найдя численные значения компонент тензора напряжений, можно рассчитать величины интенсивностей сдвиговых (касательных) напряжений для тех же точек (x, z) , необходимые для выявления участков дилатансных структур вдоль этого профиля.

Предположим, что в некоторой точке (x_0, z_0) двумерного профиля XZ реализовано некоторое сосредоточенное силовое воздействие F на геологическую среду. Природа такого воздействия может быть как естественной, например реализация сейсмического события (землетрясение или криповая подвижка), так и искусственной, реализуемой человеком, так называемой возбуждённой (или наведённая) сейсмичностью, которая может возникнуть в результате добычи нефти, или при строительстве крупных гидроузлов. В любом случае произойдёт перестроение полей геодинамических напряжений как нормальных, так и сдвиговых (касательных).

Задача – оценить перестроение полей и выяснить, как это повлияет на формирование областей дилатантных структур.

Примем для начала допущение о том, что проявление сосредоточенного силового воздействия F на геологическую среду изотропно, т.е. одинаково по всем направлениям и не зависит от физико-механических характеристик среды.

При такой постановке задачи оценка компонент двумерного тензора геодинамических напряжений можно выполнить, например, по соотношениям, представленными в работе.

Объединение найденных таким образом решений, с решениями, полученными при использовании соотношений (1), (2) с учётом выражений (9) – (12), даёт возможность осуществить перестроение полей геодинамических напряжений вследствие воздействия на геологическую среду некоторой сосредоточенной силы F . Теперь перейдем к выявлению областей дилатантных структур вдоль исследуемого профиля.

Как известно, к области дилатансии относят зоны упругой среды, для которых при поле напряжений $\{\sigma_{ij}\}$ выполнено условие [15]:

$$D_{\tau} = \tau - \alpha(P + \rho gz) - Y \geq 0, \quad (13)$$

где ρ – плотность породы; g – ускорение свободного падения; z – глубина расчётного уровня; P – гидродинамическое давление; α – коэффициент внутреннего трения; Y – сцепление породы; τ – интенсивность сдвиговых (касательных) напряжений.

Таким образом, рассчитывая величины гидродинамического давления и интенсивности сдвиговых напряжений при учёте латерального и глубинного распределений плотности геологической среды и упругих модулей, по соотношению (13) можно выявить области дилатансии и их границы, что позволяет в итоге оценивать развитие сейсмической неустойчивости на исследуемой территории.

Экспериментальные исследования

Экспериментальная часть исследований выполнена для вертикального разреза земной коры на юго-востоке Турции вдоль профильного направления, недалеко от которого 6 февраля 2023 года с интервалом в девять часов произошли мощные землетрясения с магнитудами 7.8 и 7.5, причинившее фатальный ущерб многим поселениям, расположенным на территориях Турции и Сирии (рисунок 1).

По вертикальному разрезу земной коры вдоль профильного направления, приведённого на Рисунке 1, имелась вся необходимая информация о физико-механических характеристиках геологической среды и внешних воздействиях на неё, необходимых для численных расчётов [19].

Далее были выполнены оценки компонент тензора напряжений. Вначале по соотношениям систем (1), (2) с учётом выражений (11) – (14), характеризующих напряжённо-деформированное состояние геологической среды при отсутствии сосредоточенной силы (фоновое состояние), а затем – с учётом действия такой силы (активное состояние).

Рассчитано распределение величин гидродинамического давления P и интенсивности сдвиговых напряжений τ в плоскости исследуемого вертикального разреза земной коры вдоль выбранного профильного направления (Рисунок 1), и приняв значения входных величин – сцепление породы $Y = 3 \cdot 10^6$ Па; коэффициент внутреннего трения $\alpha = 0.5$; сосредото-

ченная сила $F = 10^{16}$ Н [15], по формуле (13) выполнены численные оценки величины дилатансии (области $D_r > 0$) как для фонового, так и активного состояния геологической среды. Место приложения сосредоточенной силы соответствует эпицентру первого землетрясения в Турции, произошедшему 6 февраля 2023 года на глубине 17.9 км. Результаты численных оценок приведены на рисунке 2.

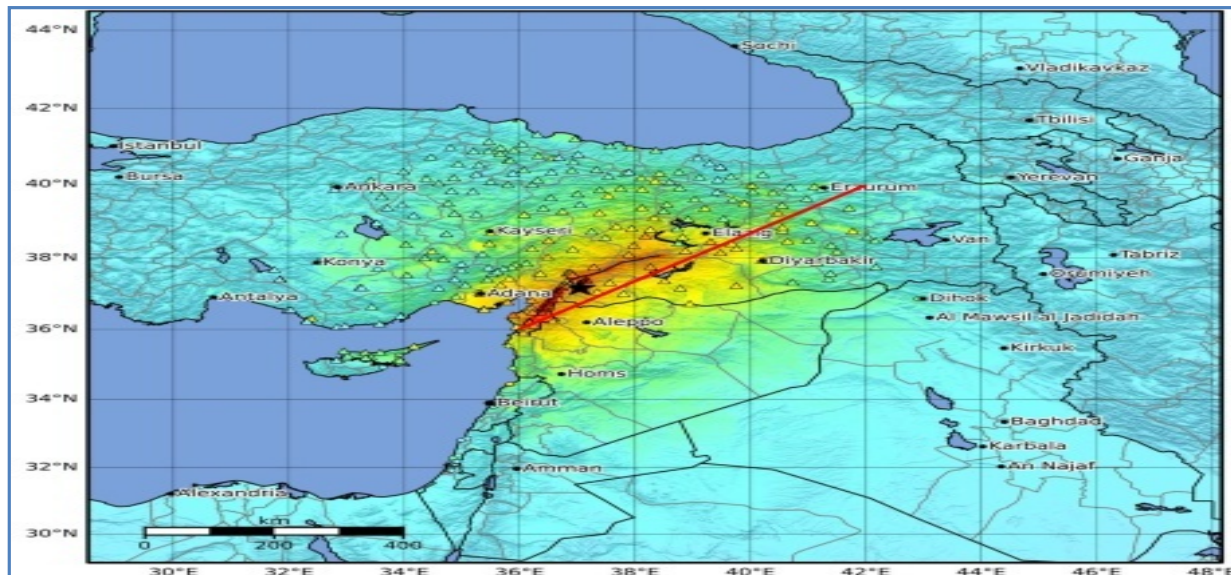


Рисунок 1 – Профиль, использованный для моделирования дилатантных структур (обозначен прямой наклонной линией) [21]. Ломаной линией, проходящей рядом со звездочкой, показан разлом, образовавшийся на земной поверхности после землетрясения
Figure 1 – Profile used for modeling dilatants structures (indicated by a straight sloping line) [21].
A broken line pass-ing near to asterisk shows a fault formed on the Earth's surface after earthquake

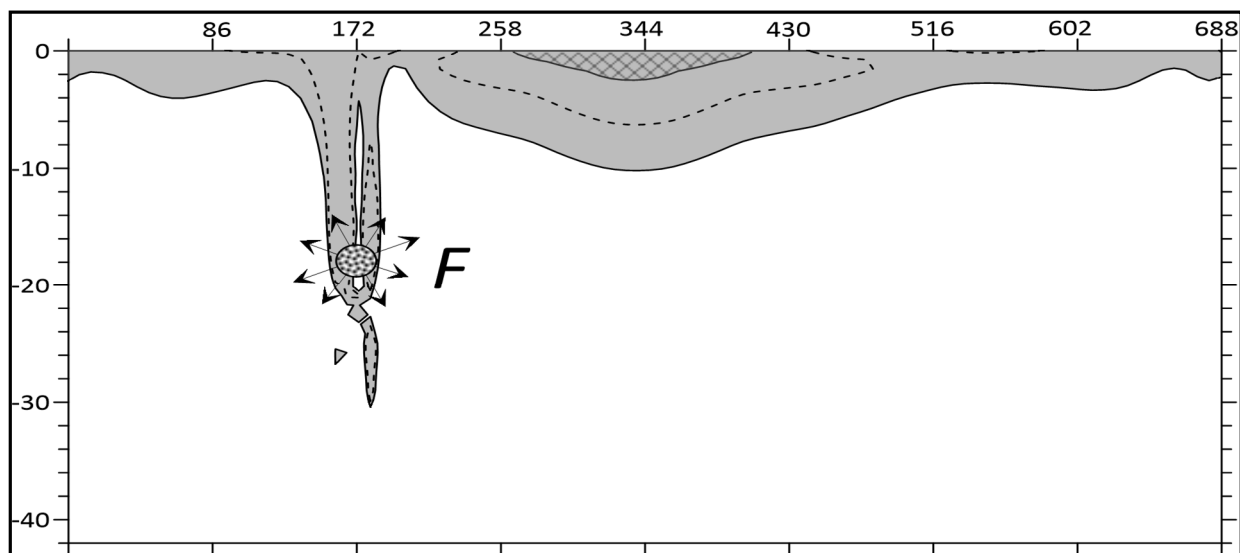


Рисунок 2 – Распределение дилатантных структур в геологической среде вертикального разреза земной коры вдоль исследуемого профиля
Figure 2 – Allocation of dilatants structures in geological environment of the Earth's crust section along the studied profile

Штриховкой на рисунке 2 показана область дилатансии, формирующаяся при фоновом состоянии, серым цветом – область дилатансии, формирующаяся при дополнительном действии сосредоточенной силы F (активном воздействии). Пунктирной линией выделены обла-

сти повышенного трещинообразования. Эпицентр землетрясения (место проявления сосредоточенной силы) показан заштрихованным кругом со стрелками.

Штриховкой в клетку на рисунке выделена дилатансная структура, отвечающая условию фонового состояния, т.е. когда напряжённо-деформированное состояние геологической среды формируется за счёт влияний на неё вертикально ориентированных внешних воздействий на верхней и нижней границах двумерного упругого слоя.

Выделенная дилатансная структура располагается в середине профиля, имеет латеральную протяжённость порядка 140 км и максимальную глубину погружения не более 2 км, указывая на потенциальную возможность разуплотнения упругой геологической среды за счёт образования сдвиговых трещин в оконтуренной области и образования разломных нарушений на дневной поверхности.

Совсем другая картина наблюдается при проявлении в геологической среде внутренней сосредоточенной силы F . Потенциальная возможность разуплотнения геологической среды и образования трещин сдвига присутствует уже вдоль всего профиля в верхних слоях земной коры с глубинным погружением этой области в районе проявления сосредоточенной силы.

Если принять максимальное значение дилатансии за единицу, то области со значениями, большими 0.5 от него, следует относить к структурам активного разломообразования, что согласуется с разломным нарушением геологической среды (Рисунок 1), образовавшемся на дневной поверхности при реализации первого землетрясения в Турции 6 февраля 2023 года.

В случае проявления в геологической среде не одной, а нескольких сосредоточенных сил, а также с учётом анизотропности их действия, наблюдаемая картина формирования дилатансных структур в этой среде ещё более неоднородна, что рассматривается в продолжающихся исследованиях.

Заключение

Выявление дилатансных структур в земной коре, особенно в её верхних слоях, имеет очень большое значение для оценки сейсмической устойчивости территорий, поскольку для таких областей характерно значительное разуплотнение геологической среды и образование трещин сдвига, приводящих к возникновению разломных нарушений с их выходом на дневную поверхность.

Представленная в статье двумерная математическая модель оценки напряжённо-деформированного состояния геологической среды для вертикального разреза земной коры вдоль исследуемого профильного направления позволяет выявлять дилатансные структуры как в условиях фоновых полей напряжений, так и в условиях проявления в геологической среде сосредоточенных сил природного или искусственного происхождения.

Наличие таких сил существенно меняет латеральное и глубинное распределение дилатансных структур, обуславливая необходимость переоценки в режиме реального времени состояния геологической среды на предмет её сейсмической устойчивости.

С этой точки зрения математическое моделирование дилатансных структур открывает значительные перспективы для прогностических оценок сейсмической устойчивости геологических структур в различных регионах мира, способствуя развитию методов предупреждения катастрофических землетрясений.

Библиографический список

1. Кейлис-Борок В. И., Кронрод Т. Л., Молчан Г. М. Расчет сейсмического риска / Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. С. 69-82.
2. Кейлис-Борок В. И., Кронрод Т. Л., Молчан Г. М. Сейсмический риск для крупнейших городов мира: предварительная оценка / Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С. 82-98.
3. Природные опасности России. Сейсмические опасности. Тематический том / Под ред. Г.А. Соболева. М.: Изд-во «КРУК», 2000. 296 с.
4. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 310 с.

5. Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы РАН, Обнинск. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Москва (www.wdcb.ru).
6. **Ананьин И. В.** Об изменении напряженности электрического поля перед и во время землетрясения / В сб.: Проблемы сейсмичности Восточно-Европейской платформы. М.: Изд-во. ОИФЗ РАН, 2000. С. 44-50.
7. **Ананьин И. В.** Ущерб, связанный с воздействием землетрясения на психическое состояние человека // Информационно-аналитический бюллетень «Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений». 1994. № 4. С. 45-48.
8. **Гохберг М. Б., Шалимов С. Л.** Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу / Отв. ред. А. О. Глико. М.: Наука, 2008. 294 с.
9. **Сидорин А. Я.** Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 90 с.
10. **Ахметшин Т. Р., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О., Габитов С. И.** Геодинамические риски: моделирование, оценки, управление: монография / Под ред. В. А. Минаева. Уфа: УНЦП Изд-во УГНТУ, 2023. 338 с.
11. **Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О.** Арктические риски: моделирование, комплексная оценка, управление. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. 420 с.
12. **Викулин А. В.** Физика Земли и геодинамика. Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 463 с.
13. **Хайн В. Е., Ломизе М. Г.** Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ, 2005. 560 с.
14. **Николаевский В. Н.** Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения. / Механика очага землетрясения. Успехи науки и техники. М.: Мир, 1982. С. 133-215.
15. **Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л.** Дилатантные структуры и электромагнитные возмущения УНЧ диапазона на этапах подготовки и развития крупного сейсмического события // Вестник ОНЗ РАН. 2010. № 2. С. 202-213.
16. **Корячко В. П., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О.** Моделирование термоупругих деформаций как источника геодинамических опасностей в Арктической зоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 83. С. 72-83.
17. **Корячко В. П., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О.** Моделирование сейсмических рисков на территориях расположения объектов критической инфраструктуры // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 133-142.
18. **Минаев В. А., Фаддеев А. О., Кузьменко Н. А.** 3-D моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 64-74.
19. **Минаев В. А., Фаддеев А. О., Невдах Т. М., Ахметшин Т. Р.** Цифровая модель геодинамических процессов в литосфере Земли // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2018. Выпуск 3. С. 9-15.
20. **Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М.** Построение глобальной математической модели при оценках напряжённо-деформированного состояния литосферы Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 68. С. 61-67.
21. Оперативная информация о сейсмических событиях: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M_7.8-Central_Turkey.jpg?uselang=ru

UDC 539.37; 551.24

MODELING OF SEISMIC STABILITY OF DILATANT STRUCTURES

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

V. A. Minaev, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Moscow University of Internal Affairs Ministry of Russia named after V. Ya. Kikot, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

A. O. Faddeev, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Moscow University of Internal Affairs Ministry of Russia named after V. Ya. Kikot, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: faol@mail.ru

The article presents a mathematical model designed to assess the seismic stability of territories that differ in their geological genesis and structure. The aim of the study is to create a model focused on identifying

dilatant structures that are an indicator of possible development of seismic instability of geological environment. Special attention is paid to quantitative reassessment of stress fields due to the manifestation of concentrated force of natural (earthquake) or artificial (induced seismicity) origin in geological environment. The results of practical implementation of the model developed for assessing seismic stability are considered on the example of identifying dilatant structures in the vicinity of the earthquake that occurred in Turkey in February 6, 2023.

Keywords: mathematical modeling, seismic stability, geological environment, vertical section of the earth's crust, dilatant structure, stress-strain state, earthquake, induced seismicity.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-85-128-138

References

1. **Keilis-Borok V. I., Kronrod T. L., Molchan G. M.** Calculation of seismic risk. *Seismic zoning of the territory of the USSR*. M.: Nauka, 1980, pp. 69-82 (in Russian).
2. **Keilis-Borok V. I., Kronrod T. L., Molchan G. M.** Seismic risk for the largest cities of the world: preliminary assessment. *Mathematical models of the structure of the Earth and earthquake prediction*. M.: Nauka, 1982, pp. 82-98 (in Russian).
3. *Natural hazards of Russia. Seismic hazards. Thematic volume* / Edited by G. A. Sobolev. M.: Publishing house «KRUK», 2000. 296 p. (in Russian).
4. **Sobolev G. A.** *Fundamentals of earthquake prediction*. M.: Nauka, 1993. 310 p. (in Russian).
5. *Operational Seismological Catalog of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Obninsk*. Source: World Data Center for Solid Earth Physics, Moscow (www.wdcb.ru) (in Russian).
6. **Ananyin I. V.** On the change in the electric field strength before and during an earthquake. *In the collection: Problems of seismicity of the East European Platform*. M.: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2000, pp. 44-50 (in Russian).
7. **Ananyin I. V.** Damage associated with the impact of an earthquake on the mental state of a person. *Information and analytical bulletin «Federal System of seismological observations and earthquake prediction»*. 1994, no. 4, pp. 45-48 (in Russian).
8. **Gokhberg M. B., Shalimov S. L.** *The impact of earthquakes and explosions on the ionosphere* / Ed. by A. O. Gliko. M.: Nauka, 2008. 294 p. (in Russian).
9. **Sidorin A. Ya.** *Harbingers of earthquakes*. M.: Nauka, 1992. 190 p. (in Russian).
10. **Akhmetshin T. R., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O., Gabitov S. I.** *Geo-dynamic risks: modeling, assessment, management: Monograph* / Edited by V. A. Minaev. Ufa: UNTSP Publishing House of USNTU, 2023. 338 p. (in Russian).
11. **Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** *Arctic risks: modeling, integrated assessment, management*. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022. 420 p. (in Russian).
12. **Vikulin A. V.** *Physics of the Earth and geodynamics*. Publishing house of KamSu im. Vitus Bering, 2008. 463 p. (in Russian).
13. **Khain V. E., Lomize M. G.** *Geotectonics with the basics of geodynamics*. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2005. 560 p. (in Russian).
14. **Nikolaevsky B. H.** Review: the Earth's crust, dilatancy and earthquakes. *Mechanics of the earthquake source. Successes of Science and technology*. Moscow: Mir, 1982. pp. 133-215 (in Russian).
15. **Sobisevich L. E., Sobisevich A. L.** Dilatant structures and electromagnetic disturbances of the UHF range at the stages of preparation and development of a major seismic event. *Bulletin of ONZ RAS*, no. 2, 2010, pp. 202-213 (in Russian).
16. **Koryachko V. P., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** Modeling of thermoelastic deformations as a source of geodynamic hazards in the Arctic zone. *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2023, no. 83, pp. 72-83 (in Russian).
17. **Koryachko V. P., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** Modeling of seismic risks in the territories of critical infrastructure facilities. *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2023, no. 84, pp. 133-142 (in Russian).
18. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuzmenko N. A.** 3-D modeling of migration of dangerous endogenous geological processes. *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2016, no. 58, pp. 64-74 (in Russian).

19. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Nevdakh T. M., Akhmetshin T. R.** Digital model of geo-dynamic processes in the Earth's lithosphere. *Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: models, analysis and management*. 2018. Issue 3, pp. 9-15 (in Russian).
20. **Faddeev A. O., Pavlova S. A., Nevdakh T. M.** Construction of a global mathematical model for estimating the stress-strain state of the Earth's lithosphere. *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2019, no. 68, pp. 61-67 (in Russian).
21. Operational information about seismic events: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: M_7.8_Central_Turkey.jpg?uselang=ru](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M_7.8-Central_Turkey.jpg?uselang=ru) (in Russian).