

УДК 539.4 + 550.34

О ВЛИЯНИИ РАЗРУШЕНИЯ ОТРЫВОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ НАРУШЕННОГО МАТЕРИАЛА В ОКРЕСТНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО СДВИГА ПО РАЗЛОМУ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2024 г. А. М. Будков, Г. Г. Кочарян*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

Для уточнения расчетных моделей подготовки землетрясений важной задачей является оценка свойств и размеров зоны динамического влияния разлома, где материал обладает повышенной трещиноватостью и проницаемостью, сниженными значениями скоростей распространения упругих волн. В статье представлены результаты численного моделирования процесса формирования нарушенной зоны при динамическом распространении разрыва землетрясения. При этом рассмотрено как разрушение породы сдвигом, так и разрушение отрывом. Показано, что общая картина разрушения скальной породы сильно зависит от глубины расположения разрыва. При использованных в расчете параметрах среды и поля напряжений, на глубине более ~ 9 км, литостатические напряжения полностью блокируют разрушение отрывом. На глубине менее ~ 6 км отрыв является основным механизмом разрушения породы.

Ключевые слова: разлом, землетрясение, динамический разрыв, разрушение материала.

Для цитирования: Будков А.М., Кочарян Г.Г. О влиянии разрушения отрывом на формирование зоны нарушенного материала в окрестности динамического сдвига по разлому в кристаллическом массиве горных пород // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 1–10. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_1

Введение

Многочисленные результаты обследования фрагментов динамических разрывов, поднятых с сейсмогенных глубин или вскрытых при бурении глубоких скважин в очагах землетрясений, убедительно демонстрируют высокую степень локализации разрушения. В отличие от приповерхностной области, где в окрестности сейсмогенного разрыва крупного землетрясения наблюдаются обширные области гигантских деформаций, на сейсмогенной глубине формируется один или несколько магистральных разрывов, окруженных относительно небольшой зоной разрушенного материала, размер которой по латерали относительно невелик [Кочарян, 2016; 2021 и др.].

В недавней статье [Будков, Кочарян, 2024] был численно смоделирован процесс распространения разрыва землетрясения вдоль существующего разлома. Отличительной особенностью подхода, примененного в этой работе, является нормировка результатов расчетов экспериментальными данными, полученными при геолого-геофизическом обследовании массивов горных пород до и после проведения подземных ядерных взрывов. Совместный анализ пространственных распределений величины интенсивности сдвига S в гипоцентральной зоне подземного взрыва и в окрестности распространяющегося разрыва, проведенный в [Будков, Кочарян, 2024], позволил оценить степень повреждения массива в окрестности разлома землетрясения. Результаты расчета показали, что динамические подвижки по магистральному разрыву «подновляют» уже существующую трещиноватость в зоне влияния разлома, образуя за счет сдвигового механизма минимальное количество новых трещин.

В статье [Будков, Кочарян, 2024] механизм разрушения отрывом не рассматривался. В тоже время существует ряд известных моделей, основанных на так называемой схеме «*fault – valve*», согласно которой при динамическом сдвиге по разлому в среде могут «открываться» каналы с аномально высокой проницаемостью [Sibson, 1992]. Так, например, в работе [Marguin, Simpson, 2023] рассматривается модель, в которой эффективная проницаемость разломной зоны на косейсмической стадии почти мгновенно увеличивается с 10^{-19} до 10^{-8} м², что может быть связано только с раскрытием зияющей трещины.

Для уточнения расчетных моделей подготовки землетрясений важной задачей является улучшение оценок свойств и размеров зоны динамического влияния разлома, где материал обладает повышенной трещиноватостью и проницаемостью, сниженными значениями скоростей распространения упругих волн.

В настоящей работе на основе результатов численного расчета процесса динамического распространения трещины сдвига вдоль фрикционного контакта рассматриваются закономерности формирования комбинированной зоны разрушения отколом и сдвигом.

Постановка задачи

Рассматривается численное решение задачи о распространении разрыва вдоль контакта блоков скальной породы с заданными физико-механическими свойствами. Сопротивление сдвигу по границе между блоками (плоскость $y = 0$) задается в виде трения с разупрочнением:

$$\tau = T(\Delta u) \operatorname{sign}\left(\frac{\partial \Delta u}{\partial t}\right), \quad \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \neq 0, \quad (1)$$

$$\text{где } T(\Delta u) = \begin{cases} \tau_u - \frac{(\tau_u - \tau_f)\Delta u}{d_0}, & \Delta u < d_0 \\ \tau_f & \Delta u \geq d_0 \end{cases},$$

u – относительное перемещение берегов, τ_u – пиковая фрикционная прочность, τ_f – остаточная фрикционная прочность, d_0 – амплитуда перемещения, при котором трение снижается до остаточного значения.

В расчетной области задано однородное поле сдвиговых напряжений $\sigma_{xy} = \tau_0$, наложенное на поле литостатических напряжений, величина которых определяется глубиной расположения участка скольжения. Величина τ_0 задавалась ниже пиковой фрикционной прочности τ_u . Ось x направлена вдоль линии контакта, а ось y – перпендикулярно к ней (рис. 1). Ось z перпендикулярна плоскости (x, y) . Задача решается в плоской постановке.

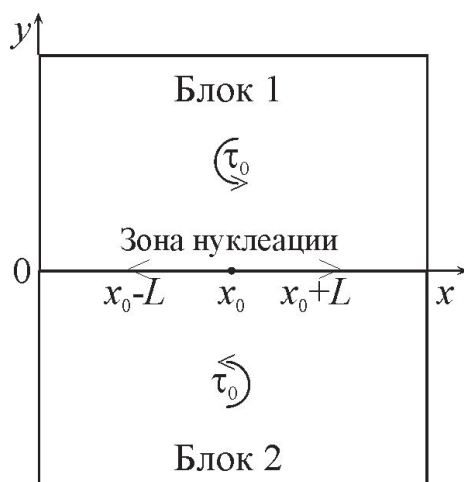


Рис. 1. Постановка задачи

Инициация распространяющегося вдоль оси x двустороннего разрыва осуществляется в точке $x = x_0$ одновременно и в положительном, и в отрицательном направлениях. Для инициирования распространения разрыва на небольшом участке контактной границы $x_0 - L_0 \leq x \leq x_0 + L_0$ (зона нуклеации разрыва [Scholz, 2019]) искусственно задавалось смещение на 10% превышающее пороговое значение u_0 , при котором трение выходит на уровень фоновых напряжений τ_0 . В результате формировался разрыв, распространяющийся вдоль плоскости контакта с начальной скоростью $V_{r0} = 0.6C_s$.

Процесс инициирования подробно описан в работах [Будков и др., 2022; Кочарян и др., 2022], где, в частности, установлена минимальная длина участка инициирования, при которой распространение разрыва не затухает в непосредственной близости от места старта.

В принятой постановке разрушение геоматериала в примыкающей к разрыву зоне происходит при достижении некоторого предельного уровня деформации за счет суперпозиции начального поля статических напряжений и динамических напряжений, излучаемых при распространении иницированного разрыва и начальных статических напряжений.

Методы расчета

Для проведения расчетов процесса деформирования при распространении динамического разрыва и для моделирования механического действия подземного взрыва использовался вычислительный комплекс, разработанный на основе лагранжева численного метода «Тензор» [Архипов и др., 2002]. Применение лагранжева подхода является предпочтительным при использовании сложных моделей деформирования геоматериалов.

Уравнения, описывающие движение и напряженное состояние твердого деформируемого материала в декартовой системе координат, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \quad v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \\ \rho \frac{dv_x}{dt} - \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0, \\ \rho \frac{dv_y}{dt} - \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} &= \rho g, \\ \rho \frac{d\varepsilon}{dt} - s_{xx} \dot{e}_{xx} - s_{yy} \dot{e}_{yy} - s_{zz} \dot{e}_{zz} - 2s_{xy} \dot{e}_{xy} - \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где t – время; x, y, z – координаты (оси x и y лежат в плоскости задачи, ось z – перпендикулярна этой плоскости); ρ – плотность; v_x, v_y – компоненты вектора скорости $\mathbf{v}$; g – ускорение свободного падения; P – давление; s_{ij} – девиатор тензора напряжений; e_j – девиатор тензора скоростей деформаций; ε – удельная внутренняя энергия; d/dt – лагранжева производная по времени:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) f.$$

Система уравнений движения замыкается соотношениями, определяющими связь между напряжениями и деформациями материала. В общем случае это могут быть уравнения состояния жидкости или газа, соотношения идеальной упругости или какая-либо более сложная модель деформирования геоматериала.

Для описания процесса деформирования скальной породы в расчетах использовалось уравнение состояния Мурнагана [Мелош, 1994]:

$$P(\varepsilon) = \frac{K^0}{n} \left[(1 - \varepsilon)^{-n} - 1 \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ – объемная деформация, K^0 – модуль объемного сжатия и критерий сдвигового разрушения породы, который представляет собой обобщенное условие Мизеса:

$$s_{ij}s_{ij} / 2 = Y^2(P) / 3. \quad (4)$$

Здесь s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, P – давление. Значение прочности $Y(P)$ изменяется в соответствии с уравнением

$$Y(P) = Y_0 + \frac{\mu P}{1 + \mu P / (Y_{PL} - Y_0)}. \quad (5)$$

Константы Y_0, Y_{PL} — играют роль сцепления грунта и предельного значения сдвиговой прочности.

Сдвиговое деформирование определяется соотношениями, которые являются композицией закона Гука и закона пластического течения Прандтля – Рейсса и имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{ds_{ij}}{dt} - s_{ik}w_{jk} - s_{jk}w_{ik} + \lambda s_{ij} &= 2Ge'_{ij}, \\ \lambda &= \frac{GQ}{\tau_2} - \frac{1}{2\tau_2} \frac{d\tau_2}{dt}, \\ Q &= s_{ij}e'_{ij}, \quad J_2 = 1/2 s_{ij}s_{ij}, \end{aligned} \quad (6)$$

где w_{ij} – компоненты тензора вращения, e'_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, G – модуль сдвига, функционал $\lambda \geq 0$, $\lambda \equiv 0$ при $J_2 < Y^2(P)/3$.

Поскольку процесс распространения разрыва может сопровождаться формированием интенсивной волны разгрузки, модель деформирования скальной породы была дополнена алгоритмом учета возможного разрушения отрывом. В разработанном алгоритме в качестве критерия возникновения разрушения отрывом используется соотношение максимальных растягивающих напряжений в рассматриваемой точке (ячейке расчетной сетки) и предела прочности породы на растяжение R_p . Для определения максимальных напряжений в ячейке необходимо преобразовать тензор напряжений в главную систему координат, в которой тензор напряжений имеет диагональный вид. В осесимметричном случае преобразование тензора напряжений при переходе от начальной системы координат x, y, z к новой системе координат $1, 2, 3$ (ось 1 совпадает с осью z) происходит в соответствии с соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= -(P + \tau_{xx} + \tau_{yy}), \\ \sigma_{22} &= -P + \tau_{xx} \cos^2 \phi + \tau_{yy} \sin^2 \phi - \tau_{xy} \sin \phi \cos \phi, \\ \sigma_{33} &= -P + \tau_{xx} \sin^2 \phi + \tau_{yy} \cos^2 \phi - \tau_{xy} \sin \phi \cos \phi, \\ \sigma_{23} &= (\tau_{xx} - \tau_{yy}) \sin \phi \cos \phi + \tau_{xy} (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь ϕ – угол между осью 2 и осью x ; P, τ_{ij} – давление и компоненты девиатора тензора напряжений в начальной системе координат; σ_{ij} – компоненты полного тензора напряжений в новой системе координат. Поскольку в главной системе координат $\sigma_{23} = 0$, имеем:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2\tau_{xy}}{\tau_{yy} - \tau_{xx}} \right), \quad \sigma_{23} = 0, \\ \sigma_{11} &= -(P + \tau_{xx} + \tau_{yy}), \\ \sigma_{22}, \sigma_{33} &= -P + \frac{1}{2} \left(\tau_{xx} + \tau_{yy} \pm \sqrt{(\tau_{xx} - \tau_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2} \right).\end{aligned}\quad (8)$$

В процессе численного решения задачи на каждом шаге по времени в каждой ячейке расчетной сетки тензор напряжений переводится в главную систему координат, и полученные величины максимальных растягивающих напряжений сравниваются с соответствующими величинами предела прочности на растяжение R_{pi} . В случае выполнения условия $\sigma_i > R_{pi}$ считается, что в направлении, перпендикулярном оси i , возникла трещина и следует изменить величины P , τ_{xx} , τ_{yy} и τ_{xy} так, чтобы они соответствовали напряжениям в разрушенном материале. Приведение напряжений в ячейке к состоянию разрушенного материала производится по следующему алгоритму.

Считается, что при раскрытии трещины движение среды направлено перпендикулярно поверхности трещины. Поэтому следует скорректировать только вызвавшее отрыв главное напряжение σ_i и привести его к текущему значению прочности R_{pi} с сохранением неизменными остальных главных напряжений. Текущее значение прочности R_{pi} зависит от степени разрушения грунта и определяется из уравнения:

$$\frac{dR_{pi}}{dt} = \frac{R_p}{Q_*} \left(-\frac{dW_d}{dt} \right), \quad (9)$$

где R_p – начальная прочность на отрыв, W_d – диссипированная в результате разрушения энергия, (предельное значение энергии неупругого деформирования грунта при отрыве). Таким образом, прочности на отрыв по осям 1, 2 и 3 в процессе разрушения могут отличаться друг от друга. В качестве Q_* можно выбрать величину

$$Q_* = \frac{R_p^2}{2E} \eta,$$

где E – модуль Юнга, η – коэффициент ($\eta = 0.2-0.5$). Для приращения за шаг по времени величины диссипированной энергии имеем:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^3 \sigma_i \Delta \varepsilon_i^p, \quad (10)$$

где $\Delta \varepsilon_i^p$ – приращение пластической деформации вдоль оси i . Если предположить, что приращения деформаций связаны с приращениями напряжений посредством постоянных Ляме:

$$\lambda \Delta V^p + 2\mu \Delta \varepsilon_i^p = \Delta \sigma_i, \quad (11)$$

то в общем случае для одновременного разрушения по нескольким направлениям имеем:

$$\Delta W = \frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^3 \sigma_i \left(Q_i - \frac{\lambda}{3K} \sum_{i=1}^3 Q_i \right), \quad (12)$$

$$\text{где } Q_i = \begin{cases} \sigma_i - R_{pl} & \text{при } \sigma_i > R_{pl}, \\ 0 & \text{при } \sigma_i \leq R_{pl}. \end{cases}$$

В случае наличия в рассматриваемой ячейке расчетной сетки разрушения отрывом, после приведения главных напряжений к соответствующим текущим значениям прочности на отрыв, полученные значения главных напряжений необходимо преобразовать назад в исходную систему координат x, y, z :

$$\begin{aligned} P' &= -\frac{1}{3}(\sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33}), \\ \tau'_{xx} &= P' + \sigma'_{22} \cos^2 \phi + \sigma'_{33} \sin^2 \phi, \\ \tau'_{yy} &= P' + \sigma'_{22} \sin^2 \phi + \sigma'_{33} \cos^2 \phi, \\ \tau'_{xz} &= (\sigma'_{33} - \sigma'_{22}) \sin \phi \cos \phi. \end{aligned} \quad (13)$$

В рамках лагранжева подхода исследования процесса сдвигового деформирования нарушений сплошности реализованы с помощью задания на контакте блоков специального граничного условия – контактной границы с проскальзыванием. При этом тангенциальные компоненты тензора напряжений на контактной границе определяются с помощью выбранной для проведения расчета данного участка границы модели сдвигового деформирования межблокового контакта.

Результаты расчетов

При численном моделировании процесса распространения разрыва рассмотрен горизонтальный контакт двух однородных блоков скальной породы. Использовался следующий набор констант модели среды: $\rho_0 = 2.992 \text{ г/см}^3$, $\nu = 0.25$, $c_p = 6 \text{ км/с}$, $c_s = 3.46 \text{ км/с}$, $n = 3$, $\mu = 0.8$, $Y_0 = 0.134 \text{ ГПа}$, $Y_{PL} = 0.75 \text{ ГПа}$, прочность породы на отрыв $R_{pl} = 5 \text{ МПа}$, что примерно соответствует горной породе типа диабазы или габбро.

На границе, между блоками (плоскость $y = 0$, ось x направлена вдоль границы) задано условие скольжения с трением. Поскольку протяженность зоны разрушения по латерали мала по сравнению с глубиной залегания разрыва, градиентность поля литостатических напряжений не учитывалась. Напряженное состояние считалось однородным и соответствовало плосконапряженному состоянию породы на выбранной глубине, дополненному наличием фоновой сдвиговой компоненты тензора напряжений $\tau_{xy} = \tau_0$. Сопротивление сдвигу по контакту задавалось в виде закона трения (1). В расчетах использована модель «прочного, но хрупкого» разлома (остаточная прочность существенно ниже пиковой) [Noda, Lapusta, 2013]. Были использованы следующие фрикционные параметры $\tau_u = 111 \text{ МПа}$, $\tau_f = 55.2 \text{ МПа}$, $d_0 = 8 \text{ мм}$. $\tau_0 = 73.8 \text{ МПа}$.

Заметим, что в рассматриваемой задаче плоскость $x = 0$ не является плоскостью симметрии. Центром симметрии является точка инициирования разрыва [Будков, Кочарян, 2024]. В связи с этим инициирование разрыва происходит в точке $x_0 = 2000 \text{ м}$ плоскости, $y = 0$ в обе стороны, а при анализе расчетных данных можно ограничиться рассмотрением полуплоскости $x > 0$.

Рассмотрим особенности, связанные с принятой постановкой задачи. На рис. 2 показаны графики зависимости от глубины корня квадратного из второго инварианта тензора литостатических напряжений (с учетом τ_0) и предела прочности породы на сдвиг. В соответствии с приведенными данными устойчивость породы к внешнему воздействию уменьшается с увеличением глубины и на глубинах более $\sim 15 \text{ км}$, при заданных прочностных характеристиках породы, скальный массив становится изначально разрушенным. Это означает, что в рассматриваемой постановке задачи глубина расположения разрыва ограничена величиной $\sim 14 \text{ км}$.

С другой стороны, наличие фоновой сдвиговой компоненты напряжений $\tau_0 = 73.8 \text{ МПа}$ приводит к тому, что на глубинах менее 4 км возникают растягивающие напряжения, превышающие заданную прочность породы на отрыв. Этот факт иллюстрирует рис. 2, на котором показаны зависимости от глубины диагональных компонент тензора литостатических напряжений в главных осях при наличии фонового сдвига τ_0 . Таким образом, диапазон глубин расположения разрыва в рассматриваемой постановке задачи ограничен интервалом $\sim 5\text{--}14 \text{ км}$.

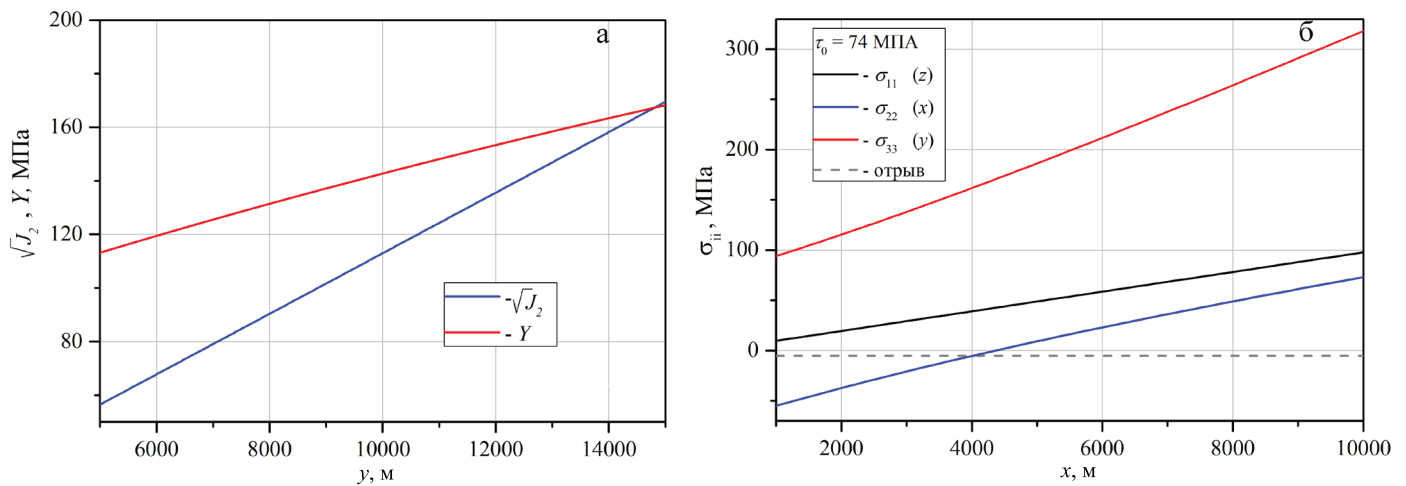


Рис. 2. Особенности соотношения параметров поля напряжений и прочности породы на различных глубинах для принятой постановки задачи: а – зависимости от глубины корня квадратного из второго инварианта тензора литостатических напряжений и предела прочности породы на сдвиг; б – зависимости от глубины диагональных компонент тензора литостатических напряжений в главных осях. Пунктиром показана прочность породы на отрыв

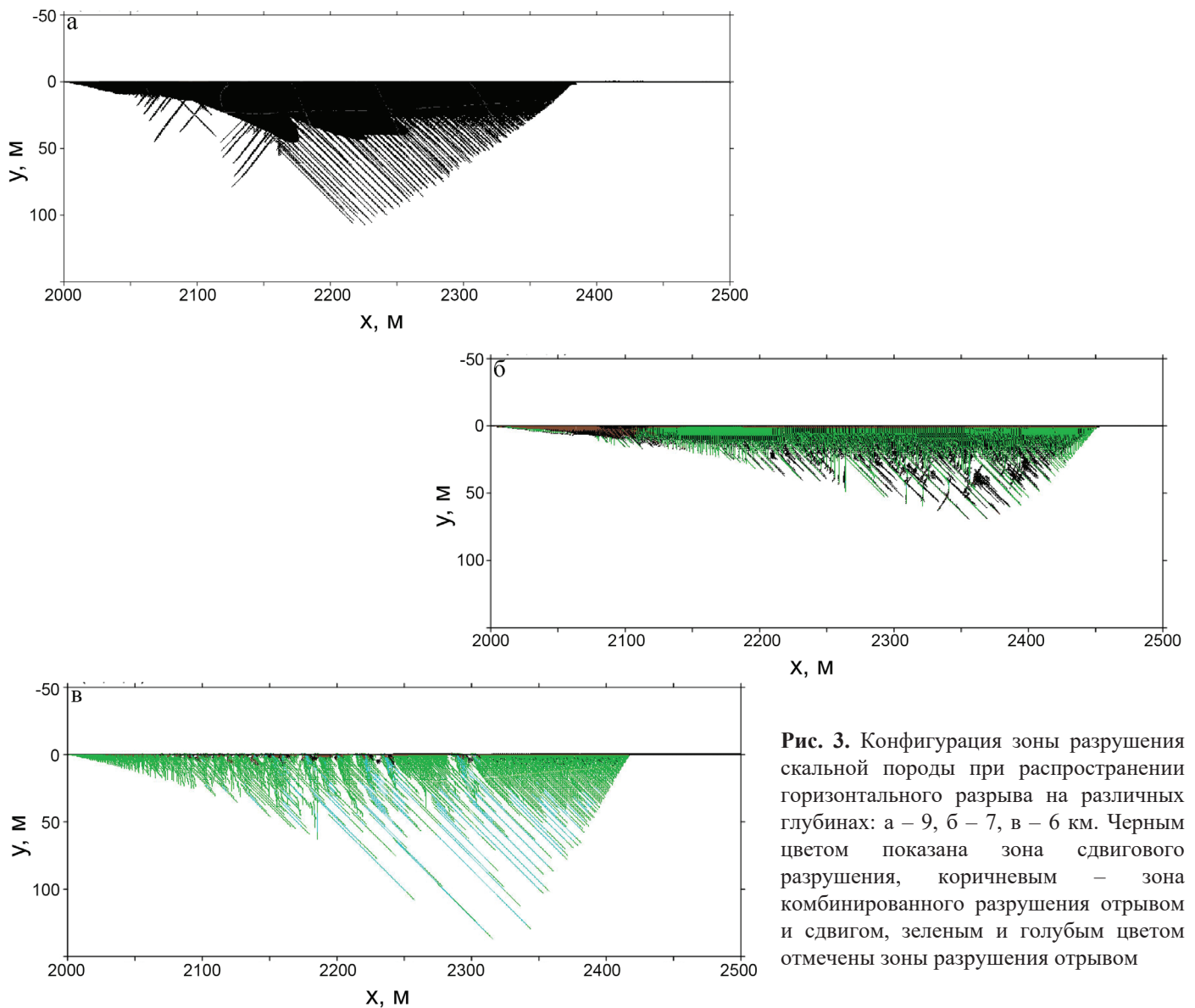


Рис. 3. Конфигурация зоны разрушения скальной породы при распространении горизонтального разрыва на различных глубинах: а – 9, б – 7, в – 6 км. Черным цветом показана зона сдвигового разрушения, коричневым – зона комбинированного разрушения отрывом и сдвигом, зеленым и голубым цветом отмечены зоны разрушения отрывом

На рис. 3 приведены полученные в расчетах конфигурации зоны разрушения при распространении горизонтального разрыва на глубинах 9, 7 и 6 км. Все данные относятся к одному и тому же моменту времени $t = 180$ мс. Цветами выделены зоны с разными механизмами разрушения. Зеленым – зона одиночных трещин отрыва растягивающим напряжением σ_{22} (ось 2 в главных осях тензора напряжений близка к оси x), голубым – зона парных трещин отрыва напряжениями σ_{11} и σ_{22} (ось 1 совпадает с осью z начальной декартовой системы координат).

На глубине 9 км литостатическое давление полностью подавляет отрыв и разрушение породы происходит исключительно за счет деформации сдвига (рис. 3а). На глубине 7 км разрушение отрывом слабо влияет на форму и размеры по латерали зоны нарушенного материала. Участки разрушенной сдвигом породы чередуются с участками трещин отрыва (рис. 3б). При дальнейшем уменьшении глубины залегания разрыва преобладающим становится разрушение отрывом (рис. 3в). Сброс напряжений, связанный с появлением трещин отрыва, приводит к резкому уменьшению зоны разрушения сдвигом, которая локализована лишь в непосредственной близости от плоскости разрыва. Этот вывод подтверждают данные рисунков 4а и 4б, на которых показаны зоны разрушения при распространении разрыва на глубинах 7 и 6 км в породе с бесконечно большой прочностью на отрыв. Сравнение рисунков 3 и 4 показывает резкое увеличение размеров зоны сдвигового разрушения.

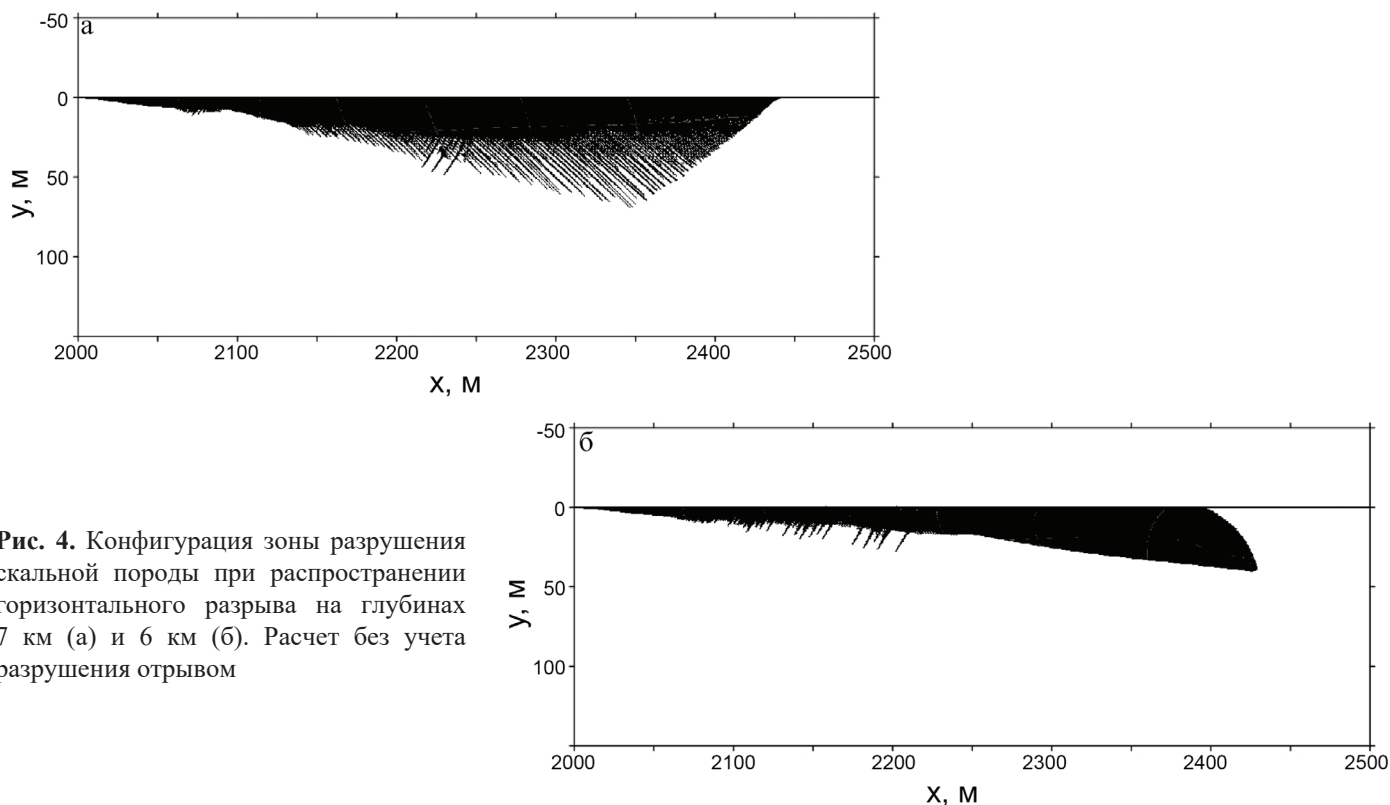


Рис. 4. Конфигурация зоны разрушения скальной породы при распространении горизонтального разрыва на глубинах 7 км (а) и 6 км (б). Расчет без учета разрушения отрывом

Заключение

В настоящей работе разработана математическая модель, позволяющая методом численного математического моделирования исследовать особенности процесса формирования зоны нарушенного материала в окрестности сейсмогенных разрывов в низкопористом кристаллическом массиве. Представленная модель распространения динамического разрыва дает возможность одновременно учесть как разрушение породы в результате сдвиговых деформаций, так и разрушение отрывом.

Результаты расчета показали, что картина разрушения скальной породы сильно зависит от глубины. При использованных параметрах, на глубине более ~ 9 км литостатические напряжения

полностью блокируют разрушение отрывом. На глубине менее ~6 км, напротив, отрыв является основным механизмом разрушения породы.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00204).

Благодарности

Авторы глубоко признательны д.ф.-м.н. Б. А. Иванову за конструктивные замечания, которые помогли улучшить изложение материала.

Список литературы

- Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др.* Механическое действие ядерного взрыва. М. : Физматлит. 2002. С. 50–58.
- Будков А.М., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г.* Моделирование сверхсдвигового режима распространения разрыва по разлому с гетерогенной поверхностью // *Физика Земли*. 2022. № 4. С. 135–150. <https://doi.org/10.31857/S0002333722040019>
- Будков А.М., Кочарян Г.Г.* Формирование зоны нарушенного материала в окрестности динамического сдвига по разлому в кристаллическом массиве горных пород // *Физическая мезомеханика*. 2024. Т. 27. № 1. С. 102–116. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_84
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 424 с.
- Кочарян Г.Г.* Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // *Физика Земли*. 2021. № 4. С. 3–41. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
- Кочарян Г. Г., Будков А.М., Кишкина С.Б.* Влияние структуры зоны скольжения разлома на скорость распространения разрыва при землетрясении // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25. № 4. С. 84–93. https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_84
- Мелови Г.* Образование ударных кратеров. М. : Мир. 1994.
- Sibson R.H.* Implications of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*. 1992. Vol. 211(1–4). P. 283–293. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90065-e](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90065-e)
- Marguin V., Simpson G.* Influence of fluids on earthquakes based on numerical modeling // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. Vol. 128. P. e2022JB025132. <https://doi.org/10.1029/2022JB025132>
- Noda H., Lapusta N.* Stable creeping fault segments can become destructive as a result of dynamic weakening // *Nature*. 2013. Vol. 493. P. 518–521. <https://doi.org/10.1038/nature11703>
- Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge : Cambridge University Press. 2019. – 512 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>

ON THE INFLUENCE OF TENSILE FAILURE ON THE FORMATION OF A DAMAGE ZONE IN THE VICINITY OF DYNAMIC SHEAR ALONG A FAULT

© 2024 A. M. Budkov, G. G. Kocharyan*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

To construct adequate computational models for the preparation of earthquakes, it is important to use correct estimates of the properties and dimensions of the fault damage zone, where the material has increased fracturing and permeability, and reduced elastic wave propagation velocities. The article presents the results of numerical modeling of the process of formation of a disturbed zone during the dynamic propagation of an earthquake rupture. In this case, both shear and tensile failure of rocks were considered. It is shown that the overall pattern of rock destruction strongly depends on the depth of the rupture. With the parameters of the environment and the stress field used in the calculation, at a depth of more than ~ 9 km, lithostatic stresses completely block the destruction by tensile. At depths less than ~6 km, avulsion is the main mechanism of rock failure.

Keywords: fault, earthquake, dynamic rupture, rock damage.