

УДК 550.34

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДВИЖКИ НА РАЗЛОМЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗАКАЧКИ ФЛЮИДА

© 2024 г. В. Ю. Рига¹, *, С. Б. Турунтаев^{1,2,3}, **

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова, г. Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия

*E-mail: rigavu92@gmail.com

**E-mail: stur@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 19.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Рассматривается вопрос возникновения сейсмичности, индуцированной закачкой флюида в недра. Представлена модель вложенных трещин, позволяющая моделировать процесс фильтрации флюида в породе, содержащей трещины или разломы, с учетом изменения фильтрационных свойств последних в процессе изменения порового давления. Процесс деформации разлома описывается с использованием метода разрывных смещений. Модель применяется для анализа влияния закачки флюида в непосредственной близости от разлома на его последующую деформацию. Исследуется переход подвижек разлома от асейсмических к сейсмическим при изменении параметров закона трения или параметров закачки флюида. Найдены условия, при которых в рамках предложенной модели возможно возникновение сейсмических подвижек.

Ключевые слова: индуцированная сейсмичность, закон *rate-and-state*, тектонический разлом, фильтрация, флюидодинамика.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050113>, EDN: EJNLOR

ВВЕДЕНИЕ

Использование минеральных ресурсов сопровождается воздействием на недра в ходе добычи как твердых полезных ископаемых, так и углеводородов. Климатические проблемы, остро встающие перед человечеством, требуют расширенного использования альтернативных источников энергии (в том числе геотермальных) и закачки парниковых газов в недра. Разработка месторождений углеводородов, развитие геотермальной энергетики, захоронение опасных отходов и парниковых газов, извлечение метана из месторождений угля – все это приводит к воздействиям на подземные флюидные системы и сопровождается изменениями порового давления и вещественного состава подземных флюидов. Наиболее ярко реакция подземных флюидных систем на воздействие проявляется в росте сейсмической активности в районах воздействия, в сильных и даже катастрофических

землетрясениях, происходящих, в том числе, в сейсмически спокойных регионах.

Исследованию причин, статистики, механизмов развития сейсмичности, индуцированной воздействием на флюидные системы посвящено большое количество публикаций [Scuderi, Collettini, 2016; 2018; Rubinstein, Mahani, 2015; McGarr et al., 2015; McGarr, 2014; Hincks et al., 2018; Ruiz-Barajas et al., 2017], особенно в последние годы, что связано, прежде всего, с ростом негативных последствий разработки сланцевых месторождений углеводородов и геотермальных проектов. В работе [Weingarten et al., 2015] показано, что резкий рост сейсмичности центральных районов США с 2009 г. связан с технологическими особенностями разработки сланцевых месторождений углеводородов – проведением массовых многостадийных гидравлических разрывов пласта. О масштабах проблемы и причинах возникновения сейсмичности можно судить на основании работы [Rubinstein, Mahani, 2015],

авторы которой делают вывод о том, что основной причиной повышенной сейсмичности является изменение порового давления в районе тектонических разломов, которые в результате активизируются; при этом индуцированная сейсмичность наблюдается на расстояниях до десятка километров от закачивающей скважины на глубинах до 5 км. Землетрясения, индуцированные закачкой отработанной воды в США, имели магнитуды до $M = 5.3$ (Тринидат, Колорадо, август 2011 г.), $M = 5.6$ (Праг, Оклахома, ноябрь 2011 г.). Рост сейсмической активности в Оклахоме [Varbour et al., 2017] привел к введению властями штата ограничений на объем и темп закачки, после чего с 2015 г. количество землетрясений с $M > 3$ стало несколько меньшим, хотя величина суммарного сейсмического момента за месяц изменилась незначительно.

Отметим крупнейшее за последние 100 лет мелкофокусное землетрясение в Южной Корее с магнитудой 5.4, которое произошло 15.11.2017 г. [Grigoli и др., 2018]. Данное событие связывают с реализацией проекта по использованию геотермальной энергии. Скважина для закачки воды находилась в непосредственной близости от системы из двух крупных разломов. В рамках геотермального проекта в недра были закачаны тысячи кубических метров воды за период более года. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что данное событие было индуцированным.

Сейсмичность в результате реализации проекта по добычи геотермальной энергии в 2006 г. возникла в районе города Базель, Швейцария [Haring et al., 2008]. Там уже через 6 часов после начала пробной закачки воды произошло сейсмическое событие с магнитудой $M_L = 2.6$, после чего закачка была остановлена. Спустя 6 часов произошло еще одно сейсмическое событие с магнитудой $M_L = 3.4$, события продолжали регистрироваться в течение следующего года.

Приведенные примеры говорят о том, что проблема индуцированной сейсмичности встает все более остро. Остается актуальным вопрос об условиях, приводящих к возникновению индуцированной сейсмичности, а также о возможности по известным параметрам тектонических разломов и породного массива в целом, с учетом неопределенностей этих параметров, прогнозировать вероятность возникновения и максимальные магнитуды индуцированной сейсмичности. Вопрос о влиянии различных процессов и исходных условий на подвижки по разлому рассматривался в ряде статей. В работе

[Norbeck, Horne, 2015] рассмотрено несколько случаев сейсмичности, вызванной закачкой жидкости в разлом, исследуется вклад пороупругих и термоупругих напряжений в общее снижение нормального напряжения на разломе. В работе [Norbeck et al., 2015] рассматривается влияние нормальной жесткости разлома и начального значения касательного напряжения на динамику асейсмического скольжения разлома. В работе [Hincks et al., 2018] рассмотрено влияние пороупругих эффектов и объема закачки на сейсмичность в Оклахоме. В целом чаще всего в работах исследуется поведение конкретной конфигурации разлома в пласте с заданными свойствами с небольшим их варьированием [Mortezaei, Vahedifard, 2017; Norbeck et al., 2016].

В настоящей статье рассматривается влияние порового давления на относительное движение берегов разлома. Выполненные работы являются продолжением ранее проводимых исследований в этом направлении, представленных в статьях [Turuntaev, Riga, 2017; Riga, Turuntaev, 2019; 2021]. Для моделирования использован метод вложенных трещин [Lee, Cho, 2002; Li, Lee, 2008; Norbeck et al., 2015], который позволяет достаточно гибко и менее затратно с вычислительной точки зрения моделировать процессы фильтрации флюида и деформации разлома. Исследовалась задача в постановке, близкой к работе [Cappa et al., 2018]. Помимо некоторых отличий в выборе параметров, в нашей работе использовался более сложный двухпараметрический закон трения. Параметры закона трения брались на основе работ [Okazaki, Katayama, 2015; Carpenter et al., 2014; 2015].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматривается единичный разлом (рис. 1) в бесконечной однородной упругой слабопроницаемой среде (0.01 мД), вблизи которого производится закачка воды с постоянным расходом, равным 23 л/ч. Закачка проводилась до момента, пока общий объем закачанной жидкости не достигал значения 60 м^3 , зачем закачка останавливалась. Размер расчетной области 6 км поперек разлома и на 10 км вдоль, он выбран достаточно большим, чтобы граничные условия не сказывались на динамике порового давления. Разлом высокопроницаем, его проницаемость растет по мере увеличения порового давления. Значения напряжений брались соответствующими залеганию разлома на глубине несколько километров, нормальное напряжение было равно 64 МПа, давление за счет закачки флюида повышалось

до ~20 МПа. Решается несвязанная задача фильтрации флюида и деформации разлома, при этом считается, что изменение порового давления меняет только эффективные напряжения, полные напряжения не меняются. Отметим, что на первом этапе поле давления рассчитывалось во всей расчетной области, на втором этапе, когда вычислялась деформация разлома, бралась только та часть разлома (с некоторым запасом), на которой нарушается критерий Кулона. Проницаемость разлома определялась на основе кубического закона течения между двумя плоскостями [Witherspoon et al., 1980], но при этом использовалось не расстояние между берегами разлома, а эффективная гидродинамическая ширина, которая зависит от деформации контактной зоны разлома при изменении давления $a_n = a_{h0} + \frac{\Delta p}{k_n}$, где a_{h0} – начальное значение ширины, k_n – нормальная жесткость разлома.

Процесс фильтрации в породе описывается уравнением неразрывности и уравнением Дарси:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = q \tag{1}$$

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \tag{2}$$

где ϕ – пористость породы; ρ – вязкость флюида; \vec{v} – скорость фильтрации флюида; q – источник член; k – проницаемость; μ – вязкость флюида; p – давление. Флюид и порода считались слабосжимаемыми.

При описании скольжения применяется безинерционное приближение, трение на разломе

уравновешивается касательным напряжением [Ben-Zion, Rice, 1997]:

$$\tau_0 + \Delta\tau - \eta v = \mu_f \bar{\sigma}_n + S_0 (S_0 = 0), \tag{3}$$

где: τ_0 – начальное касательное напряжение, действующее на берегах разлома; $\Delta\tau$ – квазистатическое изменение напряжения, вызванное деформацией разлома; ηv – слагаемое, позволяющее аппроксимировать инерционные эффекты при высоких скоростях деформации; $\eta = \frac{G}{2v_s}$; G – модуль сдвига; v_s – скорость поперечных волн; S_0 – коэффициент сцепления; $\bar{\sigma}_n$ – эффективное нормальное напряжение; μ_f – коэффициент трения.

В силу того, что нами рассматривался единственный разлом с однородными свойствами, выбранное значение коэффициента сцепления непринципиально, так как оно будет влиять только на то, при каком значении порового давления начнется скольжение при заданных величинах μ_f, σ_n, τ_0 . Так как в наших расчетах мы задаем длину разлома, на которой нарушается критерий Кулона за счет порового давления (о чем подробнее будет сказано далее), выбор другого значения величины S_0 привел бы к увеличению выбранного τ_0 , никак не влияя на получаемые результаты. Таким образом, для определенности, коэффициент сцепления был выбран равным 0.

Деформация разлома моделировалась методом разрывных смещений [Shou, Crouch, 1995] и рассматривалась только вдоль его плоскости (рис. 2). В районе скважины, там, где разлом потенциально может скользить из-за изменения давления, его разбиение было равномерным,

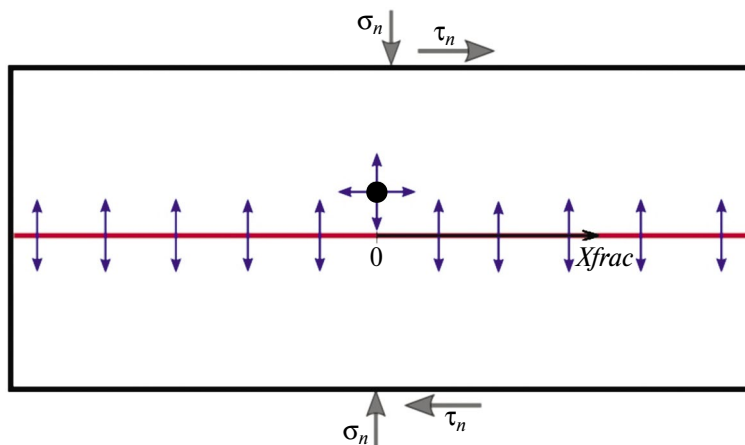


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого процесса. Синие стрелки показывают направление фильтрации жидкости, серые – направление действия нормальных и касательных напряжений, ось X_{frac} направлена вдоль разлома.

далее размер элементов увеличивался. Выбор элементов одинаковой длины ведет к упрощению геомеханической части расчета и способствует достижению большей устойчивости. Размер элементов выбирался достаточно малым – таким, чтобы он был значительно меньше критической длины для разлома (определение критической длины будет дано далее). Конкретное значение определялось в ходе численных экспериментов. Влияние сдвига одного элемента на касательное напряжение других можно описать следующим образом:

$$\Delta\tau_j(t) = K_{ji}^s \delta_i(t), \tag{4}$$

где: $\Delta\tau_j$ – изменение касательного напряжения на j -ом элементе; δ_i – касательный разрыв смещений i -го элемента; K_{ji}^s – матрица жесткости.

Стоит отметить, что для линейного разлома сдвиговое смещение его элемента не влияет на нормальное напряжение на разломе.

Для описания трения использовался закон трения *rate-and-state*. Данный тип закона трения позволяет описывать наблюдаемое сложное поведение трения и при двухпараметрическом представлении переменной состояния наиболее детально воспроизводит наблюдаемые явления [Turuntaev, Riga, 2017]. В законе *rate-and-state* коэффициент трения зависит от скорости скольжения и параметра состояния:

$$\begin{aligned} \mu_f &= \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v_*}\right) + \theta_1 + \theta_2 \\ \dot{\theta}_i &= -\frac{v}{L_i} \left[\theta_i + b_i \ln\left(\frac{v}{v_*}\right) \right], \end{aligned} \tag{5}$$

где: μ_f и μ_0 – коэффициенты трения движения и покоя; v – скорость скольжения; $v = \dot{\delta}(t)$; a , b_1 , b_2 , v_* и L_1 , L_2 – параметры закона трения; θ_i – переменная состояния, значение которой характеризует скользящие поверхности. Именно наличие зависимости трения от двух переменных состояния θ_1 и θ_2 определяет закон трения как

двухпараметрический. В приведенных расчетах параметры закона трения одинаковы вдоль всего разлома, если не сказано иного.

Набор уравнений (3)–(5) описывает процесс деформации разлома в результате изменения эффективного касательного напряжения. Данная система уравнений решалась неявным методом средней точки. При этом на каждой итерации значение скорости в средней по времени точке определялось так, чтобы выполнялось уравнение (3) [Noda et al., 2009]. Из-за присутствия члена, содержащего логарифм, для избежания численной неопределенности, элементы разлома постоянно скользят с небольшой скоростью, равной 10^{-10} м/с [McClure, 2012]. При вычислении смещения эта величина вычитается из получаемой в расчете скорости, таким образом напряжение для покоящегося разлома не меняется.

Если рассмотреть модельную схему элементарного слайдера (рис. 3), в которой блок прижимается под некоторым постоянным нормальным напряжением σ_N к подложке и его тянут через упругую связь с жесткостью k_s с постоянной скоростью, то можно сформулировать следующие утверждения: если блок скользит со скоростью протяжки, и при этом параметр состояния не меняется, то такое скольжение является стационарным; если слайдер в процессе стационарного скольжения испытает небольшое возмущение, например, изменение скорости протяжки, то скольжение может стать нестабильным (т.е. скольжение не перейдет в новое стационарное состояние, скорость блока будет постоянно меняться). Анализ в приближении теории малых возмущений показывает, что для этого должны выполняться два условия: $b_1 + b_2 > a$ и $k_s < k_{cr}$, где k_{cr} – критическое значение жесткости, определяемое параметрами закона трения [Gu et al., 1984]. Физический смысл этой величины заключается в том, что при меньших значениях жесткости упругой связи при возмущении системы в какой-то момент реализуется ситуация, когда сила сопротивления сдвигу (сила трения)

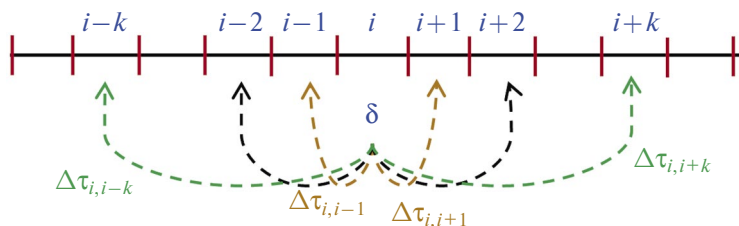


Рис. 2. Схематическое представление разбиения разлома. Деформация каждого элемента влияет на напряженное состояние окружающих элементов.

с ростом перемещения снижается быстрее, чем сила упругости пружины – и это приводит к возникновению неустойчивости. При стационарном скольжении динамическая часть коэффициента трения $\mu_f = (a - b_1 - b_2) \ln \left(\frac{v_{st}}{v_*} \right)$. Из этого выражения видно, что соотношением величин a, b_1, b_2 определяется степень

разупрочнения разлома, при $b_1 + b_2 > a$ динамическая часть коэффициента трения при заданной скорости скольжения отрицательна, и чем больше разница $b_1 + b_2 - a$, тем больше уменьшается коэффициент трения. Если же какое-либо из этих условий не выполняется, то скольжение будет стабильным. Выражение для критической жесткости:

$$k_{cr} = \bar{\sigma}_n \frac{2a}{L_1 + L_2} \cdot \overline{k_{cr}} \left(\rho = \frac{L_1}{L_2}, \beta_1 = \frac{b_1}{a}, \beta_2 = \frac{b_2}{a} \right) \tag{6}$$

$$\overline{k_{cr}} = \left[(\beta_1 - 1) + \rho^2 (\beta_2 - 1) + 2\rho(\beta_1 + \beta_2 - 1) + \sqrt{\left[(\beta_1 - 1) + \rho^2 (\beta_2 - 1) \right]^2 + 4\rho^2 (\beta_1 + \beta_2 - 1)} \right] / (4\rho).$$

При резком переходе от одной скорости скольжения слайдера к новому значению (от v_0 к v_1) параметр состояния меняется как $\theta_i \sim e^{-y/L_i}$ (рис. 4), таким образом L_i – характерное расстояние, на котором происходит изменения параметра состояния θ_i (физический аналог – характерный размер шероховатости).

В случае разлома, который представлен разрезом в упругой среде, жесткость разлома зависит от его длины [Кочарян, Спивак, 2003] и при заданном нормальном напряжении можно определить критическую длину разлома, при которой его жесткость будет равна критической при заданных значениях параметров закона трения.

В силу того, что эффективное нормальное напряжение непрерывно меняется, в качестве опорного значения было выбрано такое значение, при котором стационарное значение силы трения становилось равным касательному напряжению, и таким образом критическая длина определяется следующим образом:

$$L_{crit} = \frac{G}{\pi(1-\nu)K} \Big|_{K=K_{cr}} = \frac{G(L_1 + L_2)}{\pi(1-\nu) \cdot 2a \bar{\sigma}_{n, st, sl} \overline{k_{cr}}} \tag{7}$$

$$\bar{\sigma}_{n, st, sl} = \sigma_{n, 0} - p_{st, sl} = \frac{\tau_0}{\mu_0}.$$

Здесь: G – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; K – жесткость разлома; $\overline{k_{cr}}$ – безразмерная критическая жесткость из (6); $p_{st, sl}$ – давление, при котором статическое значение силы трения становится равным касательному напряжению, действующему на разлом; $\bar{\sigma}_{n, st, sl}$ – соответствующее значение эффективного нормального напряжения на разломе.

Для выявления особенностей поведения разлома в рамках предложенной модели были так же проведены расчеты для модели типа слайдер-блока, в которой точка протяжки покоится, меняется лишь нормальное напряжение на разломе. Параметры для слайдер-модели соответствовали параметрам рассматриваемого разлома: вначале блок покоится, движение безынерционно (т.е. масса пренебрежимо мала),

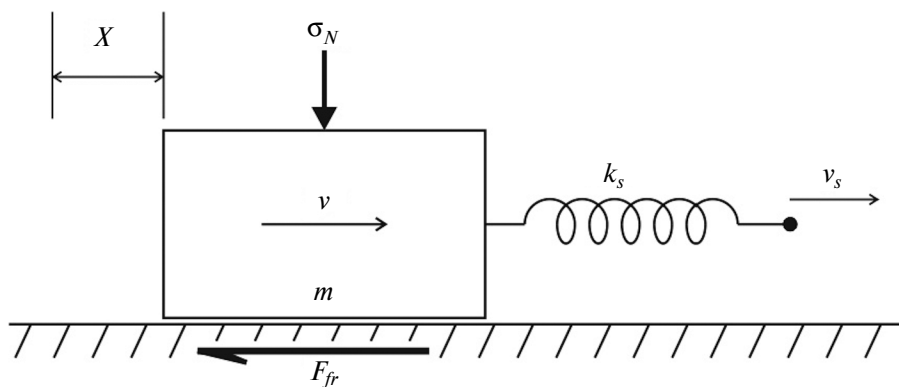


Рис. 3. Схематическое представление слайдер-модели.

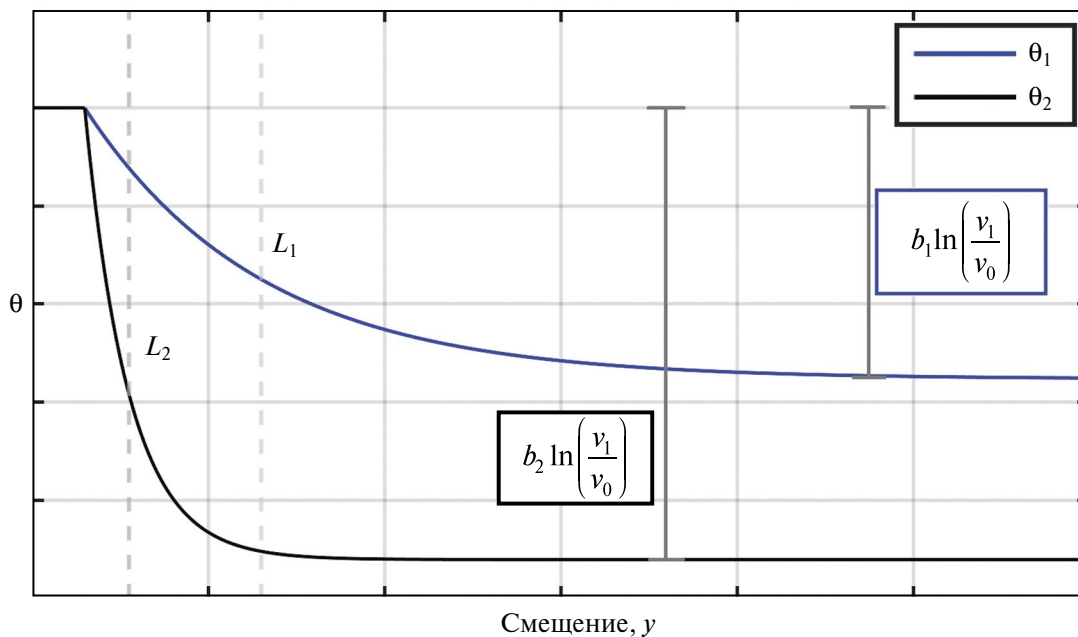


Рис. 4. Изменение параметров состояния θ_i при скачкообразном изменении скорости слайдера с величины v_0 до v_1 . L_1 и L_2 – характерные расстояния, на которых параметры состояния θ_1 и θ_2 приходят к новому стационарному состоянию. Новые стационарные значения величины θ_i при скольжении со скоростью v_1 отличаются от начальных значения на величину $b_i \ln\left(\frac{v_1}{v_0}\right)$.

начальное натяжение пружины дает соответствующее касательное напряжение τ_0 , жесткость связи бралась как в формуле (4), но в приближении одинаковых по скорости элементов. Задавались различные величины длины модельного разлома для слайдер-модели, и для него вычислялась жесткость из (7). Эффективное нормальное напряжение менялось за счет изменения порового давления, которое бралось как среднее давление на соответствующее длине разлома в полной постановке.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим результаты расчетов, в которых демонстрируется процесс перехода скольжения от асейсмического к сейсмическому при изменении параметров b_1 и b_2 таким образом, что их соотношение не меняется, так же, как и все остальные параметры закона трения. Здесь критерием типа скольжения будет являться скорость скольжения: если она меньше 5 мм/с, то движение будет считаться асейсмическим, иначе – сейсмическим. Данное пороговое значение, разделяющее два типа движения, обычно выбирается в пределах от 10 мкм/с до ~10 мм/с [Guglielmi et al., 2015; Coppa et al., 2018; McClure, 2012], но выбор конкретного значения качественно на результат не влияет. Изменение параметров b_1 и b_2

приводит к изменению параметра, отвечающего за степень разупрочнения разлома при скольжении: $\epsilon = \frac{b_1 + b_2 - a}{a}$. Было выбрано несколько наборов значений параметров закона трения из работ [Gu et al., 1984; Guglielmi et al., 2015; Coppa et al., 2018]. Часть результатов расчетов представлена на рис. 5. На них показана зависимость максимальной достигаемой скорости скольжения разлома в приближении слайдер-модели и в приближении разреза в упругой среде при различных значениях параметра ϵ и параметра относительной жесткости k_s/k_{cr} . Для слайдер-модели были так же рассмотрены различные значения величины жесткости разлома. Увеличение L_0 для слайдер-модели, равносильное уменьшению жесткости разлома, ведет к необходимости большего смещения разлома для компенсации падения эффективного напряжения. Для “нежестких” разломов динамика величины трения на берегах разлома оказывается несущественной и наблюдается плавный переход от асейсмического к сейсмическому скольжению. Для более “жестких” разломов ключевой оказывается динамика трения на разломе. Из приведенных графиков видно, что для однопараметрической версии закона трения переход к сейсмическому скольжению происходит при значении величины k_s/k_{cr} , близкой к 1.

При переходе к двухпараметрическому закону трения картина усложняется из-за того, что параметры состояния θ_1 и θ_2 начинают вести себя асинхронно со смещением. Чем больше соотношение $\rho = \frac{L_1}{L_2}$ отличается от единицы, тем больше закон трения отличается от однопараметрического (при $\rho = 1$ он вырождается в однопараметрический с величиной $b = b_1 + b_2$). При этом переход к асейсмическому скольжению наблюдается уже при величине k_s/k_{cr} отличной от 1, и это отличие тем больше, чем больше разница между b_1 и b_2 .

При рассмотрении упругой модели разлома переход к сейсмическому скольжению происходит также резким скачком, но граница перехода смещена к большим значениям ϵ и, соответственно, меньшим значениям k_s/k_{cr} . Это связано с тем, что скорость скольжения и смещение частей разлома неоднородны вдоль разлома и эффективная жесткость разлома отличается от теоретической, вычисленной в предположении, что сегмент рассматриваемой длины весь скользит с одинаковой скоростью в каждый момент времени. Таким образом, можно сказать, что неоднородность скольжения вследствие упругой деформации бортов разлома оказывает стабилизирующее действие на разлом. Изломы на графиках зависимости максимальной скорости от величины k_s/k_{cr} связаны с тем, что с переходом к сейсмическому скольжению в момент достижения максимальной скорости на меньшей длине разлома нарушается критерий Кулона из-за роста давления (без учета изменения касательных напряжений).

Пример расчета динамики скольжения для разлома приведен на рис. 6, рис. 7, на которых цветом показано изменение во времени скорости скольжения и касательных напряжений для разных расстояний от центра разлома x_{frac} . При плавном росте параметра ϵ сначала максимум скорости скольжения находится в центре разлома, затем он смещается дальше от центра. Это связано с тем, что наибольшее давление жидкости достигается в центре разлома (в точке проекции скважины на разлом), поэтому перемещение начинается в центре разлома, из-за этого происходит рост сдвиговых напряжений на краях границы скольжения. В итоге самое интенсивное по скорости проскальзывание наблюдается на некотором удалении от центра. Растет область, которая скользит в момент времени достижения максимальной скорости, тем самым уменьшая эффективную жесткость

разлома. При этом после первого проскальзывания в центре и уменьшения скорости скольжения, из-за роста смещения вокруг центра растет касательное напряжение на нем (выделено эллипсом на рис. 6), и при достижении определенного значения параметра ϵ сейсмическое проскальзывание происходит именно в этом месте. Переход от асейсмического к сейсмическому скольжению происходит при изменении параметра ϵ на 0.00001 (см. рис. 7.I и 7.II). За счет большего разупрочнения в начале процесса скольжения центральная часть скользит быстрее в начале процесса, раньше сбрасывает напряжение и это приводит к увеличению концентрации напряжений на краю зоны скольжения и ускорению процесса скольжения на окраинах. В какой-то момент происходит качественный переход, когда резкое проскальзывание широкой зоны с края приводит к резкому повышению касательного напряжения в центре и формированию интенсивной подвижки. Также отметим, что при возникновении сейсмической подвижки длина зоны, которая скользит, превышает до нескольких раз зону, где только повышение давления, без учета изменения напряжений, приводит к нарушению критерия Кулона.

Этот процесс также представлен на рис. 8: сначала центр медленно скользит и сбрасывает напряжение, потом происходит резкое скольжение большей части разлома, что приводит к концентрации напряжений в центре и ускорению. В этот момент ключевую роль играют не характеристики закона трения, а низкая эффективная жесткость разлома. Стоит отметить, что о конкретном значении величины жесткости можно говорить очень условно. Так, если построить график зависимости изменения жесткости от смещения для какого-то выбранного участка разлома, то наклон соответствующей кривой будет зависеть от распределения скорости скольжения вокруг выбранного участка и для одного участка даже в первые моменты времени, когда начинается скольжение, этот наклон может различаться. Например, на рис. 8а и 8б наклон графика различается в несколько раз для моментов времени, когда реализуется первичное проскальзывание и вторичное для центрального участка разлома. Жесткости в момент начала скольжения в центре разлома так же различаются на величину до 20% для различных значений параметра ϵ , так на рис. 8 разница составляет чуть менее 10%. Так же можно сравнить наклоны соответствующих зависимостей для различных частей разлома, и они так же отличаются друг от друга.

Также проведена серия расчетов, в которых варьировались расход воды и максимальный объем закачанной в скважину воды, при этом

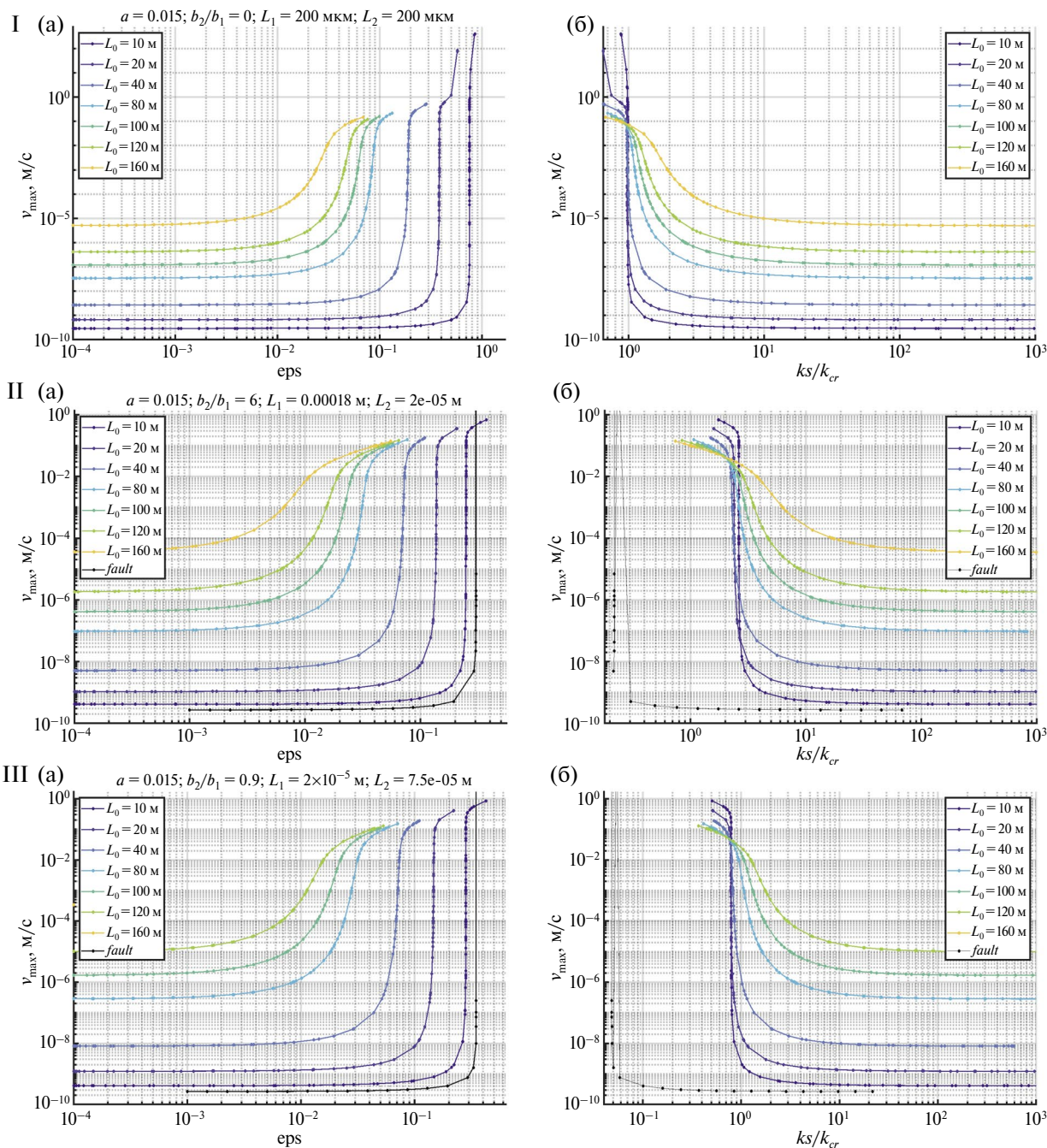


Рис. 5. Зависимости максимальной достигаемой скорости скольжения v_{\max} от величины $\epsilon = \frac{b_1 + b_2 - a}{a}$ (а) и безразмерной жесткости k_s / k_{cr} (б) для слайдер-модели с разной заданной длиной L_0 и для упругой модели разлома (*fault*): I – случай однопараметрического закона трения; II – случай двухпараметрического закона трения, $b_2/b_1 = 6$; III – случай двухпараметрического закона трения, $b_2/b_1 = 0.9$. Для упругой модели жесткость вычислялась для той длины части разлома, на которой критерий Кулона нарушался только из-за изменения эффективного напряжения в момент времени достижения максимальной скорости. Параметры расчетов указаны на графиках.

нормальное напряжение на разломе не менялось, а касательное напряжение менялось таким образом, чтобы длина той части разлома, на которой нарушался критерий Кулона только из-за изменения давления, была равна заданной

величине. Длина такой части разлома варьировалась от 20 до 520 м. Были рассмотрены несколько вариантов наборов параметров закона трения, аналогичных тем, что использовались в расчетах, описанных выше. Таким образом

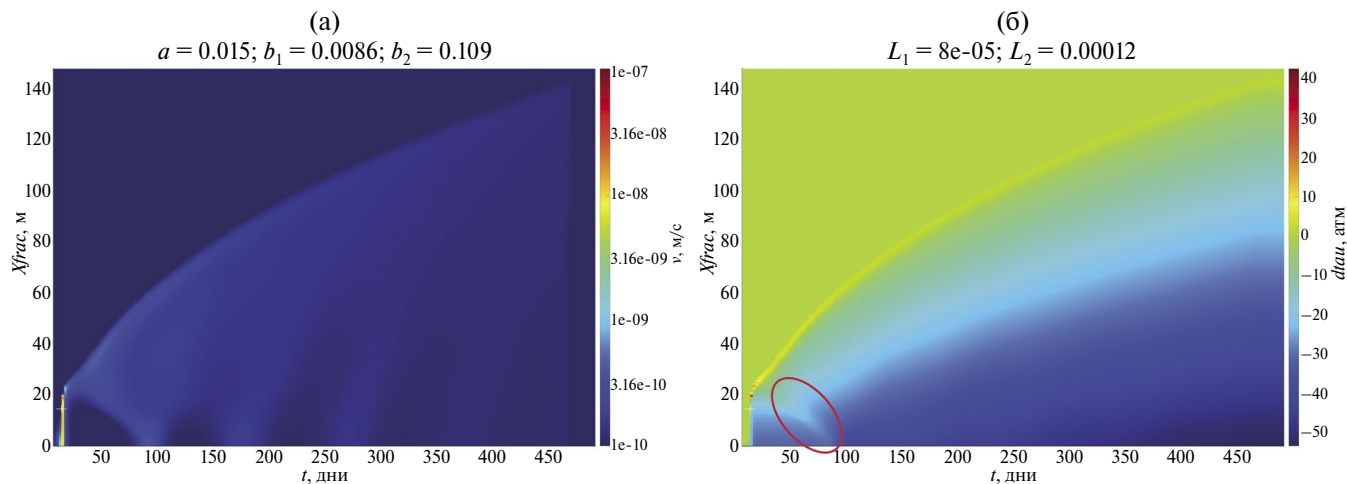


Рис. 6. Пример динамики асейсмического скольжения разлома во времени. В силу симметрии представлена половина разлома: (а) – изменение распределения скорости скольжения вдоль разлома во времени; (б) – изменение распределения касательных напряжений. По оси ординат отложено расстояние от центра разлома. На правом графике эллипсом выделен участок роста касательных напряжений от периферии разлома к центру, что приводит к повторному проскальзыванию в центре разлома. Приведены значения параметров расчета.

можно было исследовать, как особенности динамики давления (начальное давление, при котором начинается скольжение, скорость роста давления и скорость роста длины зоны на разломе, на которой нарушается критерий Кулона) влияют на результирующую динамику скольжения. Учитывая, что со временем скорость изменения давления и роста зоны скольжения уменьшается (т.е. вторые производные отрицательные), а рост скорости скольжения зависит от них, стоит ожидать, что максимальные скорости в данной постановке будут достигаться ближе к моменту начала закачки, что подтверждается расчетами. На рис. 9 показано, в какой относительный момент времени достигается максимальная скорость: все высокие значения скорости, если они реализуются, достигаются в первые 10% времени. Соответственно, ключевыми будут являться значения параметров в это время.

На рис. 10 представлена зависимость максимально достигаемой скорости от безразмерной величины изменения давления и скорости роста части разлома, на которой нарушается критерий Кулона. Давление обезразмерено на величину начальной скорости, умноженную на характерную жесткость разлома при длине скользящей части, достигаемой на момент 10% от времени скольжения. Длина зоны скольжения взята в тот же момент времени и обезразмерена на критическую длину. Видно, что наблюдается практически монотонная зависимость максимальной скорости от указанных величин, точки

группируются вокруг одного набора параметров закона трения. Как и ранее, для двухпараметрического закона трения наблюдается сильная зависимость динамики трения от асимметрии в параметрах и присутствует разброс. В целом можно сказать, что основными характеристиками являются как скорость изменения параметров давления, так и параметры разлома – степень его разупрочнения и критическая длина.

Были проведены дополнительные расчеты для определения того, как небольшие неоднородности в распределении величин параметров закона трения вдоль разлома могут повлиять на итоговую картину. В качестве сравнимого параметра была взята максимально достигаемая скорость скольжения. В наборе расчетов на каждом элементе разлома параметры a , b_1 и b_2 изменялись случайным образом на величину не более 0.1%. Сравнение результатов вычисления представлено на рис. 11. Видно, что для условий, при которых максимальная скорость скольжения меньше 0.1 м/с, неоднородности практически не влияют на эту скорость, а при больших значениях скорость для неоднородного разлома в целом получается меньше. Это связано с нарушением структуры скольжения при больших скоростях и появлению отдельных областей неоднородного скольжения (имеется в виду картина скольжения на рис. 7). В целом на примере даже небольших неоднородностей видно, что наличие как микрон неоднородностей, так и макровключений, может привести к значительному изменению реакции разлома на внешнее воздействие. Данный вопрос требует отдельного изучения.

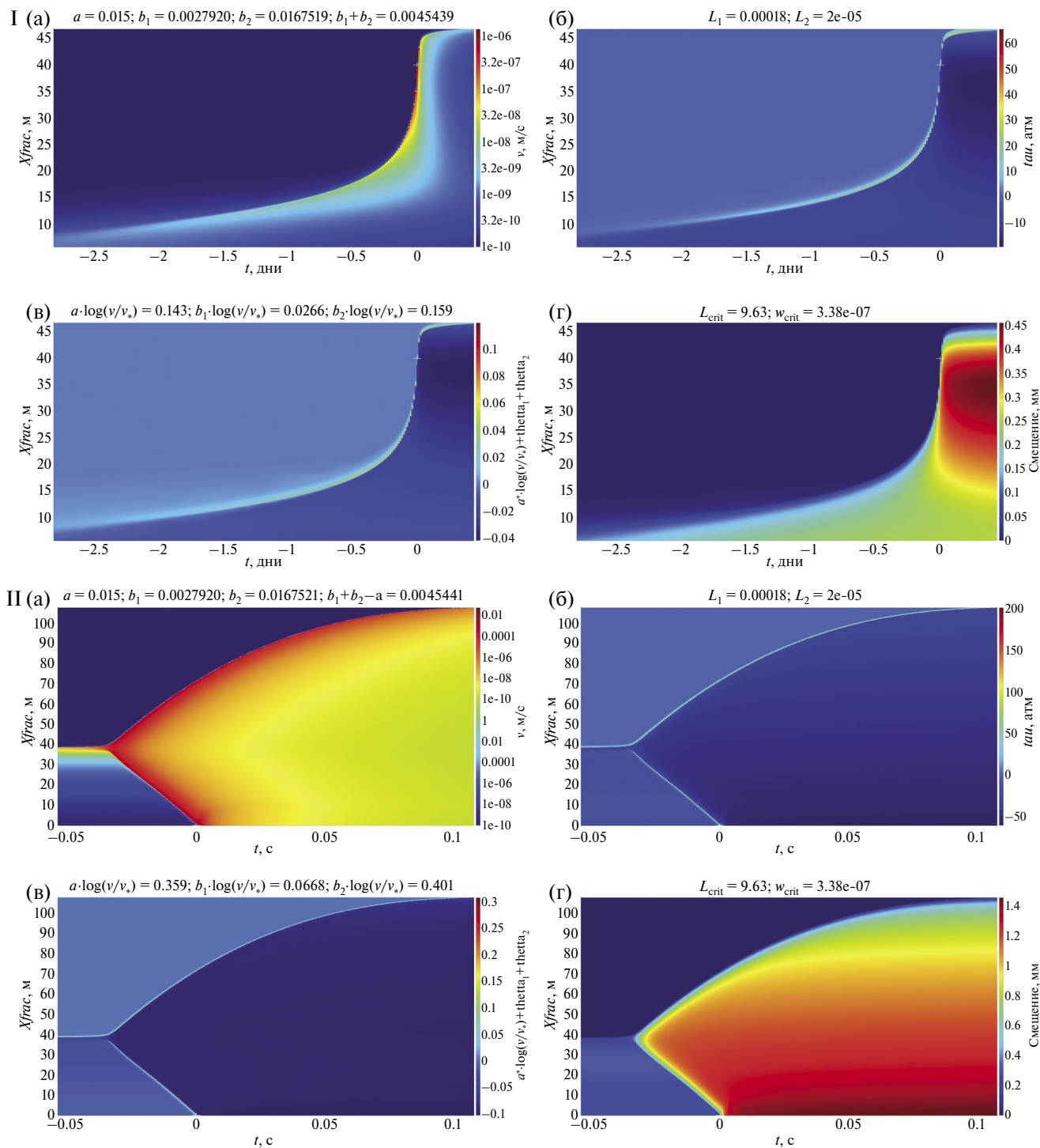


Рис. 7. Пример динамики скольжения разлома. Представлена только часть расчета. В силу симметрии представлена половина разлома: I – асейсмическое скольжение, $\epsilon = 0.30293$; II – сейсмическое скольжение, $\epsilon = 0.30294$; (а) – изменение распределения скорости скольжения вдоль разлома во времени; (б) – изменение распределения касательных напряжений; (в) – изменение динамической части коэффициента трения; (г) – изменение распределения смещения вдоль разлома. За ноль взят момент времени, в который скорость скольжения достигает максимального значения.

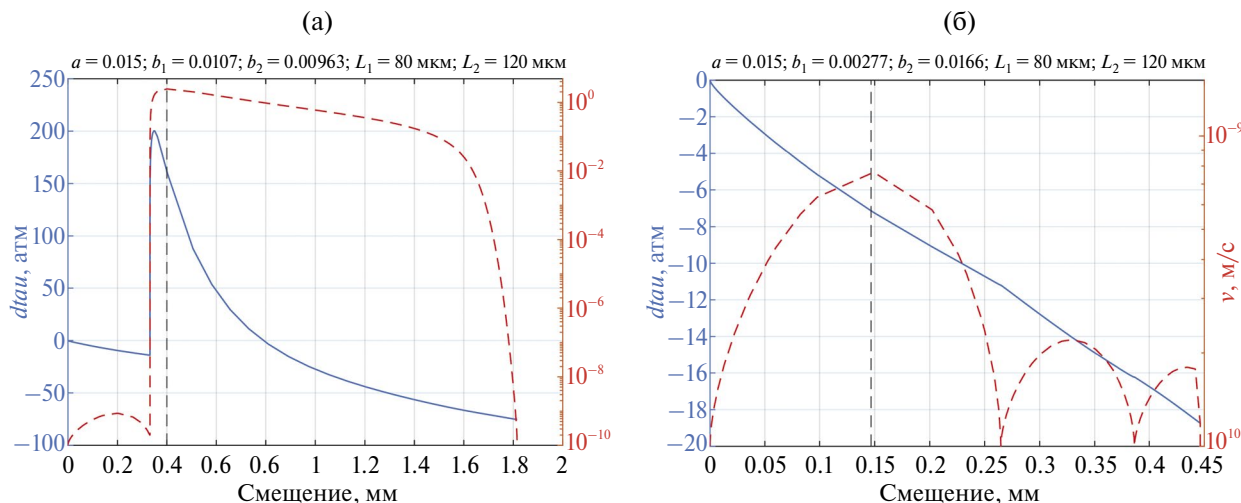


Рис. 8. Изменение скорости скольжения v и касательного напряжения $d\tau$ в центре разлома ($x = 0$ м) в зависимости от величины смещения: (а) – случай, когда реализуется сейсмическое скольжение; (б) – случай, когда реализуется асейсмическое скольжение.

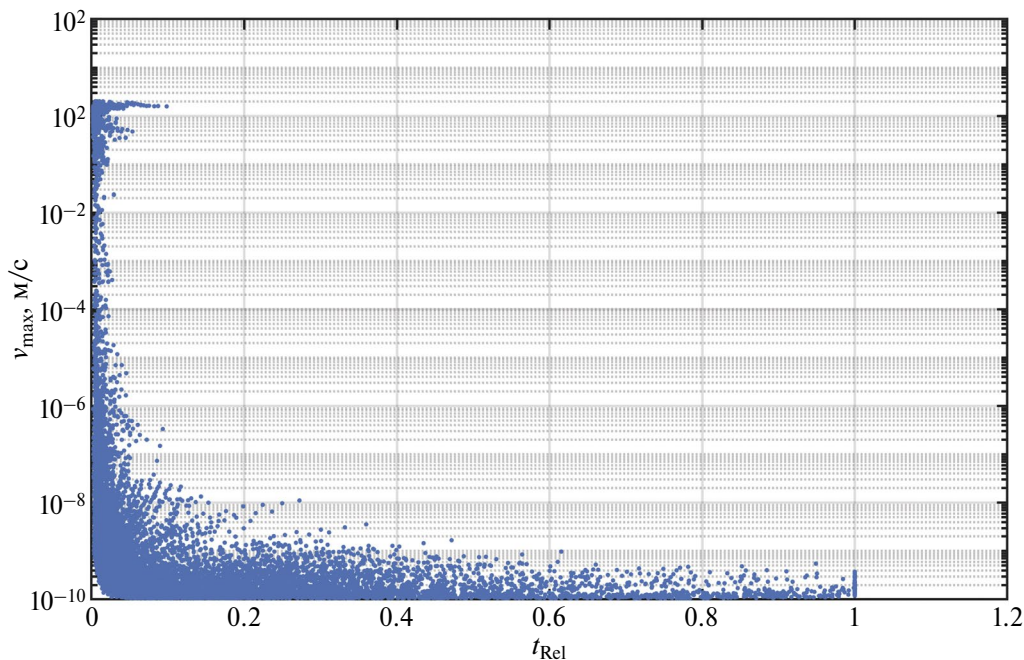


Рис. 9. Зависимость величины максимальной скорости скольжения от относительного момента времени, в который она достигалась: $t_{Rel} = (t_{v_{max}} - t_{st.sl.}) / (t_{p_{max}} - t_{st.sl.})$ – отношение разницы между моментом достижения максимальной скорости скольжения и моментом начала скольжения к разнице между моментом остановки закачки и моментом начала скольжения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделированию и изучению особенностей поведения систем, содержащих трещины и/или разломы, под действием внешнего воздействия, приводящего к возникновению индуцированной сейсмичности, посвящено немало работ. Предложенные в настоящей статье подходы

несколько отличаются и дополняют те подходы к изучению вопроса, которые можно встретить в публикациях. Так, в работе [Cappa et al., 2018] с использованием натуральных данных по закачке воды в разлом исследуется влияние различных значений нормальной жесткости на динамику изменения давления вдоль разлома, пиковую проницаемость разлома, а также на картину

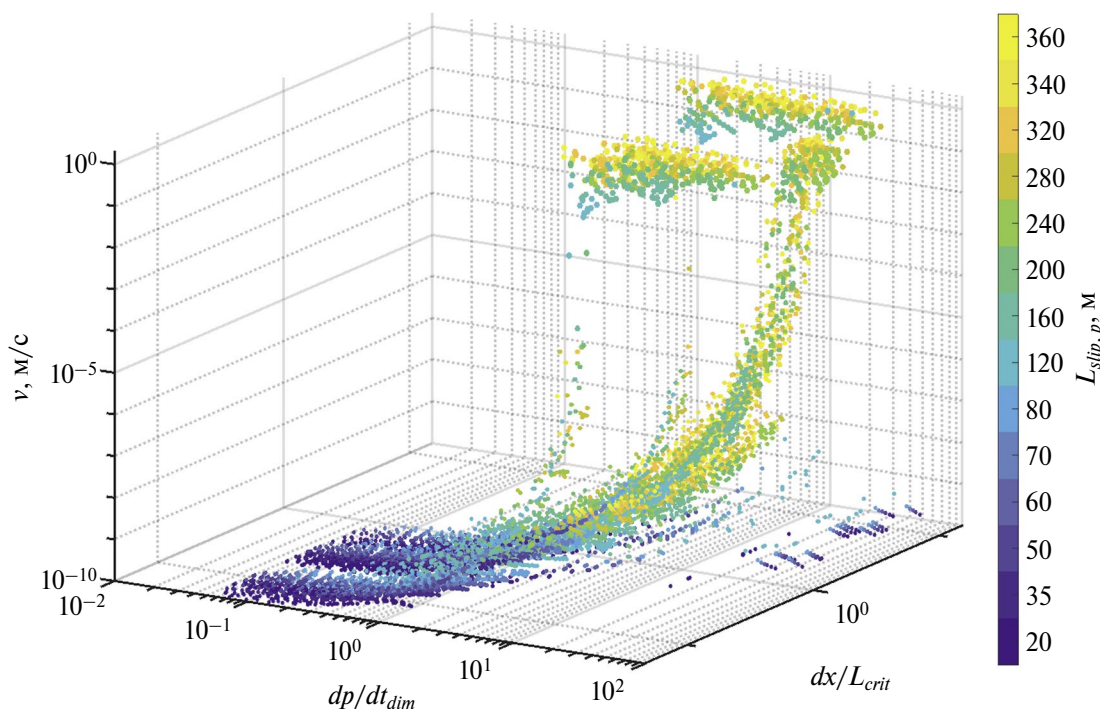


Рис. 10. Зависимость максимальной скорости скольжения от скорости изменения давления и длины зоны, на которой нарушается критерий Кулона. Каждая точка соответствует одному расчету. Цвет соответствует задаваемой длине разлома, на которой нарушается критерий Кулона только за счет роста давления.

скольжения разлома и концентрации напряжений на границах зоны скольжения. Физическая постановка задачи имела схожий характер с настоящей работой: вводилась нормальная жесткость разлома и использовался кубический закон для описания его проницаемости, для описания скольжения использовался однопараметрический закон трения *rate-and-state*. В отличие от использованного нами подхода, в этой работе присутствовала связь сдвига разлома с проницаемостью через эффект дилатансии, однако результаты численных расчетов показали, что даже при достаточно большом значении величины угла дилатансии ее вклад в длину зоны скольжения минимален. Также стоит отметить, что в упомянутой работе исследовалось только асейсмическое скольжение, и получены некоторые качественные выводы о том, какова может получиться зона концентрации напряжений в зависимости от жесткости, какие профили давления вдоль разлома могут получиться. В развитие этой работы в статье [Сарра et al., 2022] численно воспроизводятся в схожей постановке три тестовых эксперимента по закачке воды в районе разлома. Скорость скольжения при этом достигала величины порядка нескольких мкм/с. Глубина залегания исследуемого разлома составляла сотни метров, поэтому

напряжения на разломе небольшие и увеличение давления ведет к значительному падению эффективного нормального напряжения от 6.5 до 0.35 МПа. Авторы работы [Сарра et al., 2022] обнаружили, что разупрочняющее скольжение в центре ведет к концентрации напряжений на удалении от места закачки, что, в свою очередь, ведет к возникновению сейсмического скольжения. В данной работе основные события скольжения наблюдались на некотором удалении от точки закачки, что связано с тем, что в области закачки значительно растет критическая длина (что можно увидеть в формуле (7) — критическая длина обратно пропорциональна эффективному нормальному напряжению). Параметры закона трения, полученные авторами для разломов, схожи по величине с используемыми нами значениями: величина L в законе трения от 5 до 50 мкм, $b-a \sim 0.01:0.03$.

В работе [Norbeck, Horne, 2018] авторы, используя более сложную связную постановку и однопараметрический закон трения типа *rate-and-state*, исследуют поведение разлома, лежащего на глубине 4 км в непроницаемом фундаменте и выходящего в проницаемый пласт, при закачке воды в проницаемый пласт. Авторы получили, что для разлома, упрочняющегося при скольжении, зона скольжения непосредственно

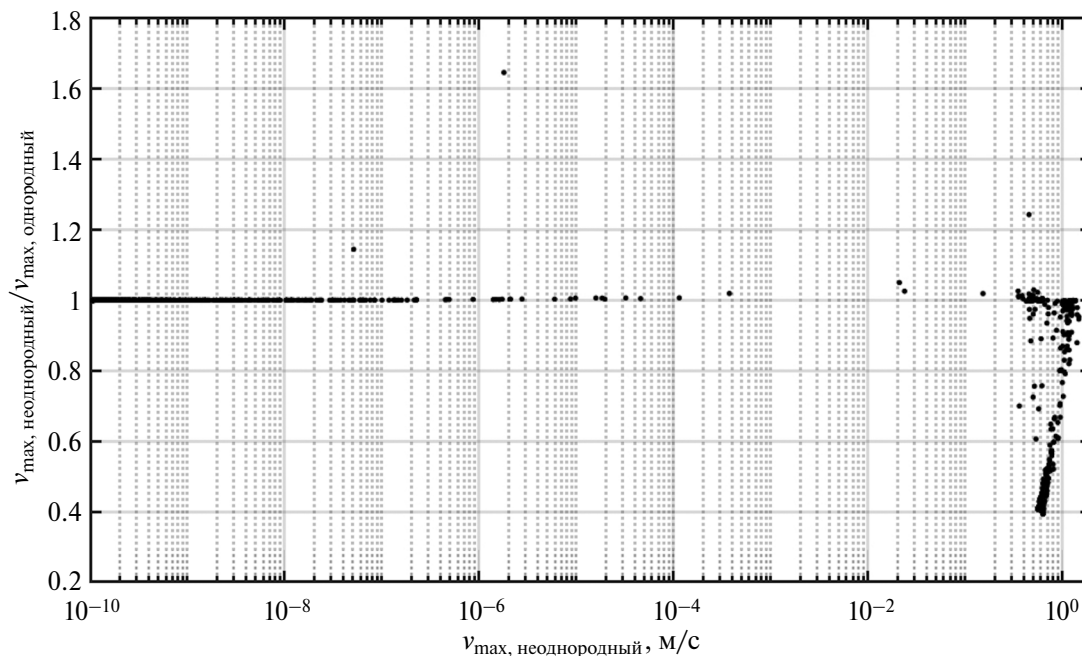


Рис. 11. Отношение максимально достигаемой скорости для случаев однородного и слабонеоднородного разломов. Каждой точке соответствует соотношение для двух расчетов, проведенных при одинаковых условиях.

привязана к зоне, до которой дошел фронт давления и был нарушен критерий Кулона, при разупрочняющемся поведении разлома проскальзывание может идти за границу такого возмущения давления. Хотя исследуемая нами система и несколько отлична, но мы получили результаты, согласующиеся с результатами этой работы. В целом полученные нами результаты дают еще более детальное понимание динамики развития скольжения разлома.

В рассмотренных выше и упомянутых во введении работах закон трения часто либо не рассматривается и для определения параметров сейсмических событий используются упрощенные подходы, либо используется динамическое трение, снижающееся на заданную величину одновременно; реже используется более сложная постановка с законом трения *rate-and-state*. Это связано с ростом вычислительной сложности при рассмотрении связной постановки. При этом не рассматривается двухпараметрический закон трения. Однако, например, в работах [Carpenter et al., 2016; Рига и др., 2018; Riga, Turuntaev, 2019] показано, что часть результатов экспериментов по изучению трения на модельном разломе не получается описать с использованием однопараметрического закона трения, но получается описывать с двухпараметрическим законом трения. Кроме того, нами было показано, что двухпараметрический закон

трения позволяет описывать хаотические процессы скольжения при правдоподобных значениях параметров. Все это обуславливает необходимость учета того, что трение на разломе нужно описывать сложнее, чем часто это делают.

Большую перспективу имеют эксперименты, проводимые на крупномасштабной лабораторной установке для изучения особенностей скольжения по разлому [Гридин и др., 2023]. Результаты этих экспериментов будут использованы для дальнейшего развития модели, представленной в настоящей статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов удалось получить детальное представление о возможном движении разлома при переходе от асейсмического скольжения к сейсмическому под действием закачки флюида. Удалось выявить и оценить значение параметров, влияющих на процесс деформации разлома, а именно: скорость изменения давления, критическая жесткость и степень разупрочнения разлома при движении. Для того, чтобы движение стало сейсмическим, по крайней мере необходимо, чтобы длина зоны скольжения была заметно больше критической длины. Для двухпараметрического закона трения величины ϵ и L_{crit} не являются однозначно определяющими движение, степень асимметрии

в законе трения может значительно менять отклик разлома на воздействие. Полученная картина эволюции скольжения от асейсмического к сейсмическому может быть использована на практике, по аналогии или в дополнение к применяемой светофорной системе [Gaucher et al., 2015]. В светофорной системе выбирается несколько граничных значений для сейсмичности (обычно в виде магнитуды событий), соответствующих безопасному режиму эксплуатации недр (зеленый уровень) или в определенной степени опасному режиму (желтый и красный уровни). При достижении граничного значения должны проводиться превентивные меры по снижению риска (желтый уровень), вплоть до остановки эксплуатации недр (красный уровень). Наши результаты добавляют потенциальные признаки, по которым можно делать выводы об уровне риска возникновения сейсмичности. На основе данных, например, микросейсмического мониторинга можно судить о динамике смещения разлома во времени, об активации той или иной его части, и по количественным характеристикам смещения сделать выводы, насколько движение по разлому близко к сейсмическому типу. Так, если скольжением захвачена часть разлома, по длине сопоставимая с критической жесткостью, или происходит быстрое нарастание зоны скольжения, то это свидетельствует о возможном приближении к критическому состоянию и необходимости принятия дополнительных мер или анализа воздействия на разлом. Представленная модель позволяет оценить как скорость подвижки по активированному разлому, так и размер области, вовлеченной в движение, и, тем самым, оценить магнитуду возможного сейсмического события. Эта задача будет решаться в ходе дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гридин Г.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г. и др. Развитие процесса скольжения по гетерогенному разлому. Крупномасштабный лабораторный эксперимент // Физика Земли. 2023. № 3. С. 139–147. DOI 10.31857/S0002333723030043

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: Академкнига. 2003. 422 с. ISBN 5-94628-078-3.

Рига В.Ю., Турунтаев С.Б., Остапчук А.А. Численное моделирование сейсмогенерирующих подвижек на основе модели rate-state экспериментов межблокового скольжения // Динамические процессы в геосферах. 2018. № 10. С. 99–109. DOI: 10.26006/IDG.2018.10.20183

Barbour A., Norbeck J., Rubinstein J. The Effects of Varying Injection Rates in Osage County, Oklahoma, on the 2016 Mw 5.8 Pawnee Earthquake // Seismological Research Letters. 2017. V. 88. № 4. P. 1040–1053. DOI:10.1785/0220170003

Ben-Zion Y., Rice J. Dynamic simulations of slip on a smooth fault in an elastic solid // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B8. P. 17771–17784. DOI:10.1029/97JB01341

Cappa F., Guglielmi Y., De Barros L. Transient evolution of permeability and friction in a slowly slipping fault activated by fluid pressurization // Nat Commun. 2022. V. 13. P. 30–39. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30798-3>

Cappa F., Guglielmi Y., Nussbaum C., Birkholzer J. On the relationship between fault permeability increases, induced stress perturbation, and the growth of aseismic slip during fluid injection // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. № 11. P. 11012–11020.

Carpenter B.M., Collettini C., Viti C., Cavallo A. The influence of normal stress and sliding velocity on the frictional behavior of calcite at room temperature: insights from laboratory experiments and microstructural observations // Geophysical Journal International. 2016. V. 205. № 1. P. 548–561. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw038>

Carpenter B.M., Saffer D.M., Marone C. Frictional properties of the active San Andreas Fault at SAFOD: Implications for fault strength and slip behavior // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. V. 120. № 7. P. 5273–5289.

Carpenter B.M., Scuderi M.M., Collettini C. et al. Frictional heterogeneities on carbonate-bearing normal faults: Insights from the Monte Maggio Fault, Italy // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. V. 119. № 12. P. 9062–9076.

Gaucher E., Schoenball M., Heidbach O., Zang A., Fokker P.A., van Wees J.-D., Kohl T. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. V. 52. P. 1473–1490. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.026

Grigoli F., Cesca S., Rinaldi A.P. et al. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea // Science. 2018. V. 360. № 6392. P. 1003–1006.

Gu J.-C., Rice J.R., Ruina A.L., Tse S.T. Slip motion and stability of a single degree of freedom elastic system with rate and state dependent friction // Appl. Mech. Phys. Solids. 1984. V. 32. № 3. P. 167–196.

Guglielmi Y., Cappa F., Avouac J.-P., et al. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip // Science. 2015. V. 348. № 6240. P. 1224–1226.

- Haring M., Schanz U., Dyer B.* Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system // *Geothermics*. 2008. V. 37. № 5. P. 469–495. DOI:10.1016/j.geothermics.2008.06.002
- Hincks T., Aspinall W., Cooke R. et al.* Oklahoma’s induced seismicity strongly linked to wastewater injection depth // *Science*. 2018. V. 359. № 6381. P. 1251–1255.
- Johann L., Shapiro S.A., Dinske C.* The surge of earthquakes in Central Oklahoma has features of reservoir-induced seismicity // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. № 1.
- Lee H.S., Cho T.F.* Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load // *Rock Mech. Rock Eng.* 2002. V. 35. № 4. P. 299–318.
- Li L., Lee S.H.* Efficient field-scale simulation of black oil in a naturally fractured reservoir through discrete fracture networks and homogenized media // *SPE Reserv. Eval. Eng.* 2008. V. 11. № 4. P. 750–758.
- Lie K.-A.* An introduction to reservoir simulation using MATLAB: User Guide for the Matlab Reservoir Simulation Toolbox (MRST). SINTED ICT. 2016. 392 p.
- McClure M.W.* Modeling and characterization of hydraulic stimulation and induced seismicity in geothermal and shale gas reservoirs: Doctoral dissertation. Stanford University. 2012. 369 p.
- McGarr A.* Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. V. 119. № 2. P. 1008–1019.
- McGarr A., Bekins B., Burkhardt N. et al.* Coping with earthquakes induced by fluid injection // *Science*. 2015. V. 347. № 6224. P. 830–831.
- Mortezaei K., Vahedifard F.* Multi-scale simulation of thermal pressurization of fault fluid under CO₂ injection for storage and utilization purposes // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017 V. 98. P. 111–120.
- Noda H., Dunham E.M., Rice J.R.* Earthquake ruptures with thermal weakening and the operation of major faults at low overall stress levels // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. American Geophysical Union (AGU). 2019. V. 114. № B7. <https://doi.org/10.1029/2008jb006143>
- Norbeck J., Horne R.* Injection-Triggered Seismicity: An Investigation of Porothermoelastic Effects Using a Rate-and-State Earthquake Model. PROCEEDINGS, Fourtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2015. SGP-TR-204.
- Norbeck J., McClure M., Horne R.* Revisiting Stimulation Mechanism at Fenton Hill and an Investigation of the Influence of Fault Heterogeneity on the Gutenberg-Richter b-value for Rate-and-State Earthquake Simulation. PROCEEDINGS, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 22-24, 2016. SGP-TR-209.
- Norbeck J., McClure M., Lo J., Horne R.* An embedded fracture modeling framework for simulation of hydraulic fracturing and shear stimulation // *Computational Geosciences*. 2015. V. 20(1). P. 1–18. DOI:10.1007/s10596-015-9543-2
- Norbeck J., Horne R.N.* Maximum magnitude of injection-induced earthquakes: A criterion to assess the influence of pressure migration along faults // *Tectonophysics*. 2018. V. 733. P. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.028>
- Okazaki K., Katayama I.* Slow stick slip of antigorite serpentinite under hydrothermal conditions as a possible mechanism for slow earthquakes // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. № 4. P. 1099–1104.
- Riga V., Turuntaev S.* Induced Seismicity Modeling Based on Two-Parameter Rate-and-State Law // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2021. V. 57. № 5. P. 627–643. DOI: 10.1134/S1069351321050153
- Riga V., Turuntaev S.* Modeling of fault deformation driven by fluid injection // *Trigger effects in Geosystems*, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham. 2019. P. 279–288. DOI: 10.1007/978-3-030-317970-0_30
- Rubinstein J.L., Mahani A.B.* Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86. № 4. P. 1060–1067.
- Ruiz-Barajas S., Sharma N., Convertito V. et al.* Temporal evolution of a seismic sequence induced by a gas injection in the Eastern coast of Spain // *Scientific Reports*. 2017. V. 7. P. 2901.
- Scuderi M.M., Collettini C.* The role of fluid pressure in induced vs. triggered seismicity: insights from rock deformation experiments on carbonates // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 24852.
- Scuderi M.M., Collettini C.* Fluid Injection and the Mechanics of Frictional Stability of Shale-Bearing Faults // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. № 10. P. 8364–8384.
- Shou K.J., Crouch S.L.* A higher order displacement discontinuity method for analysis of crack problems // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995. V. 32. № 1. P. 49–55.
- Turuntaev S.B., Riga V.Y.* Non-linear effects of pore pressure increase on seismic event generation in a multi-degree-of-freedom rate-and-state model of tectonic fault sliding // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017. V. 24. № 2. P. 215–225. DOI: 10.5194/npg-24-215-2017
- Weingarten M., Ge S., Godt J.W. et al.* High-rate injection is associated with the increase in U.S. mid-continent seismicity // *Science*. 2015. V. 348. № 6241. P. 1336–1340.
- Witherspoon P.A., Wang J.S.Y., Iwai K., Gale J. E.* Validity of Cubic Law for fluid flow in a deformable rock fracture // *Water Resour. Res.* 1980. V. 16. № 6. P. 1016–1024. DOI:10.1029/WR016i006p01016

A Numerical Study of the Phenomenon of Seismic Slip on a Fault as a Result of Fluid Injection

V. Yu. Riga^{a, *} and S. B. Turuntaev^{a,b,c, **}

^a*Dukhov All-Russian Research Institute of Automation, Moscow, 127055 Russia*

^b*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, 141701 Russia*

**e-mail: rigavu92@gmail.com*

***e-mail: stur@idg.ras.ru*

Received February 15, 2024

revised March 19, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – The issue of the occurrence of seismicity induced by injection of fluid into the subsurface is considered. A model of nested fractures is presented, which allows simulating the process of fluid filtration in a rock containing fractures or faults, taking into account the change in the filtration properties of the latter during the change in pore pressure. The process of fault deformation is described using the displacement discontinuity method. The model is used to analyze the effect of fluid injection in the immediate vicinity of a fault on its subsequent deformation. The transition of fault slip from aseismic to seismic is investigated when the parameters of the friction law or fluid injection parameters change. Conditions have been found under which seismic slip may occur within the framework of the proposed model.

Keywords: induced seismicity, rate-and-state law, tectonic fault, filtration, fluid dynamics