

УДК 550.34; 622.83

**ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ
ПОРОДНОГО МАССИВА НА ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ОЧАГОВ ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ
Ч. II: ЛАБОРАТОРНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

А. М. Будков¹, Г. Г. Кочарян^{1,2}, А. А. Остапчук¹, Д. В. Павлов¹

¹*Институт динамики геосфер РАН, E-mail: geospheres@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

²*Московский физико-технический институт,
Институтский пер. 9, 141700, г. Долгопрудный, Россия*

Вариации прочности породы и различия в напряженном состоянии массива не могут объяснить наблюдаемой разницы в эффективности излучения сейсмических волн отдельными событиями, расположенными в пределах одного горнодобывающего предприятия. Выполненные лабораторные и численные эксперименты показали, что при несущественных изменениях предельной прочности трещины различие в сдвиговой жесткости приводит к радикальному изменению КПД сейсмического события. Полученные в лабораторном эксперименте соотношения между ключевыми параметрами необходимо учитывать при построении геомеханических моделей природных объектов.

Техногенная сейсмичность, эффективность сейсмического излучения очагом, горно-тектонические удары, жесткость трещин, лабораторный и численный эксперимент

Проведенный анализ результатов наблюдений за сейсмичностью, инициированной горными работами в прочных горных породах, показал, что отношение излученной очагом энергии E_s к реализованному сейсмическому моменту M_0 различается на два-три порядка при одном и том же значении моментной магнитуды M_w [1]. Верхняя граница диапазона величины $e = E_s / M_0 \sim 10^{-4}$ соответствует так называемым “жестким событиям”, а нижняя $e = E_s / M_0 \sim 10^{-7}$ — “мягким” землетрясениям. Оценки показывают [1], что вариации в разумных пределах прочности пород и напряжений в массиве “не способны” обеспечить разброс значений приведенной энергии e в 3 порядка.

В настоящей статье речь идет в первую очередь о геодинамических явлениях сдвигового типа, к которым относятся более крупные события, расположенные на периферии зоны горных работ и связанные с существующими тектоническими структурами. Рассмотрение процесса динамического срыва на диаграмме “усилие–перемещение” [1] показывает, что величина e сильно зависит от соотношения между жесткостью массива k_m и сдвиговой жесткостью k_s тектонического нарушения, с подвижкой по которому связано сейсмическое событие.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00719).

Напомним, что в качестве жесткости массива мы используем величину

$$k_m = G / \lambda, \quad (1)$$

где λ — расстояние между соседними субпараллельными тектоническими нарушениями одного ранга; G — модуль сдвига.

Сдвиговая жесткость трещины описывается общепринятым в геомеханике образом:

$$k_s = d\tau / dW_s. \quad (2)$$

Здесь τ — напряжение, касательное к плоскости трещины; W_s — относительное смещение берегов трещины.

До сих пор остается неясным, какие параметры геомеханических моделей массива горных пород должны быть ответственны за эффективность сейсмического излучения при горно-тектонических ударах [2, 3].

Рассмотрим результаты лабораторных экспериментов и численных расчетов, в которых исследуются закономерности перехода потенциальной энергии в кинетическую в ходе прерывистого скольжения (stick-slip) — модели, которая часто применяется при описании механизма очага землетрясения.

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Лабораторные эксперименты проводились с использованием слайдер-модели, схема которой показана на рис. 1. В лабораторных опытах мраморный блок размером $8 \times 8 \times 3$ см располагался на неподвижном гранитном основании. Контакт между шероховатыми поверхностями заполнялся слоем гранулированного материала. Толщина слоя составляла около 2 мм. Нормальное усилие прикладывалось к блоку через специальное приспособление, которое исключало появление сдвиговых усилий на верхней грани подвижного блока. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружинный блок, жесткость которого могла изменяться. Скорость деформации пружины u_s была постоянной и составляла 20 мкм/с. Создаваемые сдвиговые усилия контролировались пьезодатчиком силы CFT/5kN, динамика относительного перемещения блоков — лазерным датчиком перемещения ILD2220-10 (рабочая полоса частот 0–5 кГц, точность измерения 0.1 мкм). Подробное описание лабораторной установки можно найти в [4].

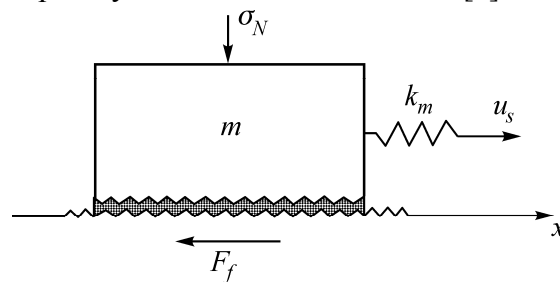


Рис. 1. Схема слайдер-модели

Заполнителем трещины служили кварцевый песок, гранитная крошка, хлористый натрий, стеклянные шарики и др. Структурные и физико-механические характеристики большинства материалов-заполнителей приведены в [4].

В численных расчетах для моделирования процесса эволюции напряжений и деформаций в зоне контакта и возникновения динамического срыва использовалась известная эмпирическая модель “Rate and State” [5, 6], в соответствии с которой коэффициент трения представляется в виде

$$\mu = \mu_0 + a \ln \frac{|\dot{x}|}{v^*} + b \ln \frac{v^* \theta}{U_c}, \quad (3)$$

где μ_0 — коэффициент трения, соответствующий стабильному скольжению со скоростью v^* ; a , b , U_c — эмпирические константы; \dot{x} — скорость перемещения. Переменная состояния θ определяется из кинетического уравнения

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{|\dot{x}| \theta}{U_c}. \quad (4)$$

В модели “Rate and State” коэффициент трения зависит от скорости скольжения и при стабильном скольжении со скоростью v_0 равен

$$\mu = \mu_0 + (a - b) \ln \frac{v_0}{v^*}. \quad (5)$$

Согласно (5), “критическим” для характера изменения фрикционного сопротивления является значение разности параметров $\Delta = b - a$. При $a > b$ коэффициент трения при любых перемещениях остается больше исходного значения, т.е. наблюдается скоростное упрочнение и система остается стабильной. При $a < b$ коэффициент трения (при перемещениях больше критической величины U_c) становится меньше исходного значения, т.е. наблюдается скоростное разупрочнение: возникает прерывистое скольжение.

Помимо наличия эффекта динамического “разупрочнения” контакта необходимым условием устойчивого прерывистого скольжения является достаточно большая сдвиговая жесткость контакта в фазе разгрузки, превышающая общую жесткость k_m нагружающей системы:

$$k_s = \sigma_N \left/ \left| \frac{d\mu}{dx} \right| \right. > k_m. \quad (6)$$

Условие (6) отвечает за “эффективность” работы нагружающей системы на этапе динамического срыва. Уменьшение положительного значения Δ приводит к снижению жесткости контакта в фазе разгрузки, которое в соответствии с (6) может быть скомпенсировано увеличением нормального напряжения σ_N . Также критическое значение Δ_* зависит от параметра U_c , который связан с возможностью возникновения условно стабильного скольжения. При малых положительных значениях Δ вариация U_c может привести к появлению условно стабильного скольжения, связанного с бифуркацией [7].

Более подробно условие (6) рассмотрено на плоскости напряжение – перемещение в [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже отмечалось, вариации прочности породы и напряженного состояния массива не способны обеспечить разброс приведенной сейсмической энергии, наблюдаемый при исследовании параметров индуцированной сейсмичности [1]. В описываемой серии экспериментов исследовался вопрос о связи энергии, излучаемой в процессе динамического срыва, с характеристиками материала-заполнителя трещины.

В качестве жесткости массива в экспериментах со слайдером выступает жесткость пружины k_m , а в качестве жесткости тектонического нарушения — жесткость модельной трещины k_s , величина которой зависит от свойств материала-заполнителя трещины.

На рис. 2 приведены диаграммы сдвиговое напряжение – относительное перемещение блоков для нескольких опытов. В экспериментах, результаты которых приведены на рис. 2, основу заполнителя составлял кварцевый песок с узким гранулометрическим составом и средним размером зерна 0.3 мм. В опытах, соответствующих кривым 1 и 2, песок увлажнялся небольшим количеством (~0.5% по массе) флюида разной вязкости. Для кривой 1 вязкость флюида составляла 0.3 мПа·с, а для кривой 2 — 16 мПа·с. В опытах 1 и 2 наблюдается картина, типичная для регулярного прерывистого скольжения, — накопление потенциальной энергии на участке

отсутствия относительного смещения блоков и динамический срыв после достижения предельного уровня касательных напряжений. Обратим внимание, что наклон участка разгрузки $k = \partial\tau / \partial x$ в точности соответствует жесткости пружины $k_m = 40$ Н/мм. В опытах со смесью глины и песка (кривые 3, 4) также наблюдаются фазы нарастания и сброса сдвигового напряжения, напоминающие прерывистое скольжение, а наклон участка разгрузки соответствует жесткости пружины, использованной в этих экспериментах $k_m = 17$ Н/мм. Во всех четырех случаях значения предельной прочности контакта были близки 40–45 кПа. Заметим, что разная амплитуда сброса напряжений для кривых 1–4 свидетельствует не о том, что коэффициенты трения скольжения материалов сильно различаются, а скорее о том, что не во всех случаях достигается коэффициент трения скольжения из-за значительного вклада вязкой компоненты (большие значения U_c и a в уравнении (3)).

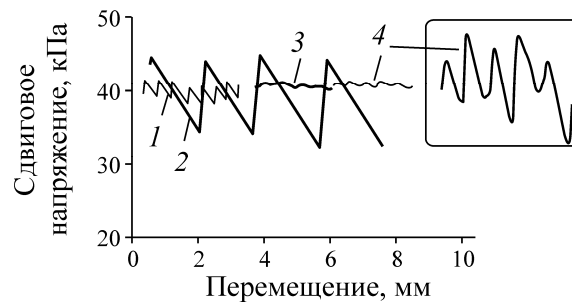


Рис. 2. Зависимости сдвиговое напряжение – относительное перемещение блоков для нескольких опытов: 1, 2 — песок, увлажненный флюидом № 1 и № 2 соответственно; 3 — сухая смесь из песка (70%) и строительной глины (30%); 4 — полностью обводненная смесь из песка (70%) и строительной глины (30%). В опытах 1 и 2 $k_m = 40$ Па/мм, в опытах 3 и 4 $k_m = 17$ Па/мм. На врезке показана кривая 4 в увеличенном масштабе

Сопоставление результатов лабораторных экспериментов с численным расчетом выполнено на рис. 3 в виде сравнения скоростей относительного движения блоков в одном из эпизодов динамического срыва. Параметры закона трения (3) подбирались так, чтобы наилучшим образом воспроизвести экспериментальную кривую.

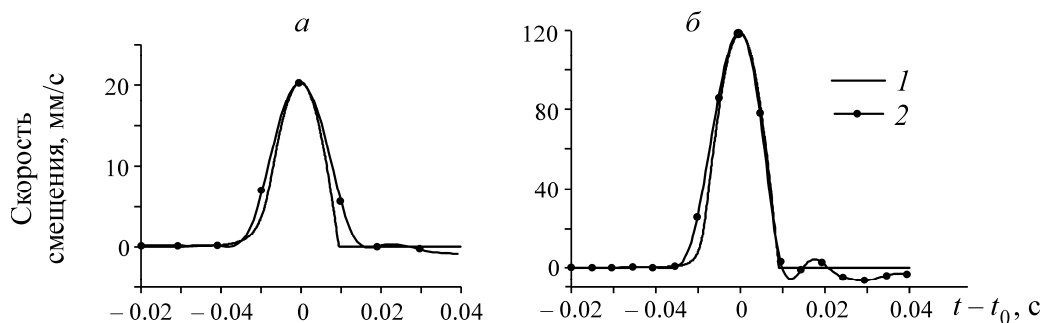


Рис. 3. Сопоставление расчетных (1) и экспериментальных (2) зависимостей скорости относительного движения блоков в процессе динамического срыва: а — песок, увлажненный флюидом № 1 ($\mu = 0.45$, $U_c = 2$ мкм, $a = 0.00032$, $b = 0.001$; $\Delta_* = 0.00016$, $k_m = 40$ Н/мм); б — песок, увлажненный флюидом № 2 ($\mu = 0.45$, $U_c = 4$ мкм, $a = 0.00515$, $b = 0.0079$, $\Delta_* = 0.00036$, $k_m = 45$ Н/мм)

Потенциальную энергию, перешедшую в кинетическую энергию движения блока (“излученную при микроземлетрясении”), удобно оценить на плоскости “напряжение – перемещение”. Как показано в первой части работы [1], излученная энергия пропорциональна площади, заключен-

ной между кривой изменения фрикционного сопротивления сдвигу контакта и линией разгрузки массива (в наших экспериментах — снижение усилия пружины). На рис. 4 представлены такие диаграммы, полученные в лабораторных и численных экспериментах. Можно видеть, что при примерно одинаковой запасенной в системе потенциальной энергии “излученная энергия” (площадь, заключенная между сплошной и штриховой кривыми) для песка, увлажненного флюидом № 2, оказывается заметно больше.

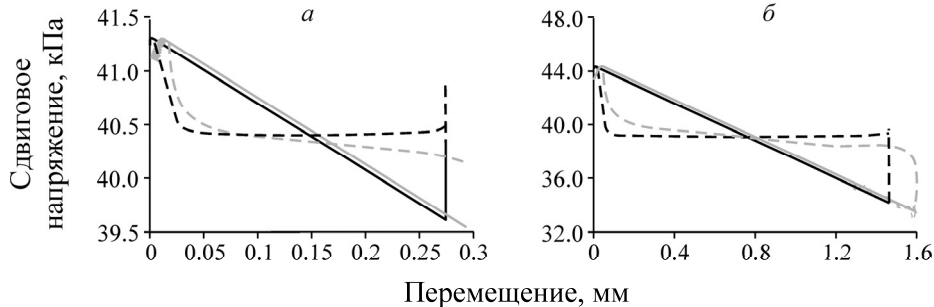


Рис. 4. Диаграммы “напряжение–перемещение”, построенные для лабораторного (серые линии) и численного экспериментов. Сплошная линия — усилие пружины, штриховая — фрикционное сопротивление контакта: *a* — песок, увлажненный флюидом № 1; *б* — песок, увлажненный флюидом № 2

Сопоставление результатов расчета с экспериментом показало, что численное моделирование процесса с использованием эмпирической модели “Rate and State” дает хорошие результаты при моделировании режима прерывистого скольжения. Для событий с малой скоростью распространения разрыва, таких как низкочастотные землетрясения и события медленного скольжения, требуется более детальное рассмотрение соотношения между вкладом кулоновского и вязкого трения.

В лабораторном эксперименте определенным аналогом сейсмического момента можно считать произведение $M_{lab} = k_m DL$. В натуре сейсмический момент есть произведение сдвигового усилия F_s , достигнутого на разрыве, на его длину L :

$$M_0 = GDL^2 = G \frac{D}{L} L^3 = \tau_s SL = F_s L, \tag{7}$$

где G — модуль сдвига массива в окрестности разлома; D — смещение при землетрясении; $S \approx L^2$ — площадь разрыва; τ_s — тангенциальное напряжение.

Соответственно для эксперимента со слайдером $F_s = k_m D$, где D — амплитуда смещения во время динамического срыва, а в качестве характерного размера принимаем размер блока L . Таким образом, в лаборатории отношение $e_{lab} = E_s / (k_m DL)$ есть аналог приведенной энергии $e = E_s / M_0$, используемой в сейсмологии для характеристики КПД землетрясения.

Анализ результатов экспериментов показывает, что эффективность излучения сейсмического источника снижается по мере роста жесткости разгрузки массива (пружины). Этот эффект отчетливо виден в серии опытов, проведенных с одним и тем же заполнителем, но с пружинами разной жесткости. Результаты, полученные в этой серии, показаны значками на рис. 5. Величина E_s определялась путем интегрирования разности экспериментальных зависимостей силы упругости F_s и силы сопротивления сдвигу от перемещения F_r :

$$E_s = \int_0^{D_c} [F_s(\xi) - F_r(\xi)] d\xi. \tag{8}$$

где D_c — перемещение, при котором $F_s(\xi) - F_r(\xi) = 0$.

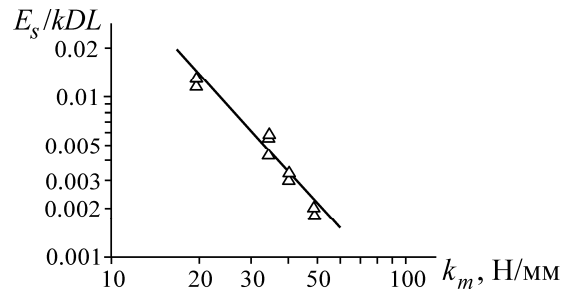


Рис. 5. Зависимость приведенной сейсмической энергии от жесткости пружины: материал-заполнитель трещины — кварцевый песок, слегка увлажненный флюидом № 3 с вязкостью 1 Па·с; значки — результаты измерений; линия — наилучшее приближение экспериментальных данных соотношением (9)

Линия на графике — наилучшее приближение данных степенной функцией

$$e_{lab} = 5.84k_m^{-2} \quad (9)$$

с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.96$.

Понятно, что эмпирическая зависимость (9) верна только в определенных пределах. При дальнейшем увеличении жесткости пружины перестанет выполняться соотношение (6), т. е. прерывистое скольжение перейдет в стабильный крип.

В окрестности критического значения k_m будут происходить, так называемые “низкочастотные” и “очень низкочастотные” события, при которых излученная энергия намного ниже, чем при “нормальных” землетрясениях [8].

Подчеркнем, что в горном деле роль низкочастотных или “тихих” землетрясений до настоящего времени недооценена. Впервые низкочастотное землетрясение зарегистрировано и детально описано именно во время проведения работ по гидроразрыву пласта на нефтяном месторождении [9]. Колебания были аномально низкочастотны и длились свыше 100 с. Событие произошло на глубине 135–280 м, что установлено по макропроявлениям (S-образное искривление обсадных колонн в пяти скважинах).

Судя по результатам лабораторных опытов, сильнейшее влияние на приведенную излученную энергию оказывают свойства заполнителя трещины. Как видно из рис. 6, величина e_{lab} изменяется на 7 порядков при минимальном различии прочностных характеристик заполнителя трещины. При этом эффективная сдвиговая жесткость трещины $k_s = d\tau/dW_s$ изменяется почти на два порядка: от 30 Па/мм для смеси песка и глины до 1900 Па/мм для песка, увлажненного флюидом № 3.

Таким образом, эффективность излучения определяется соотношением между жесткостью массива k_m и жесткостью нарушений сплошности, к которым приурочены сейсмические события k_s . Это подтверждается результатами лабораторных и численных экспериментов (рис. 4–6).

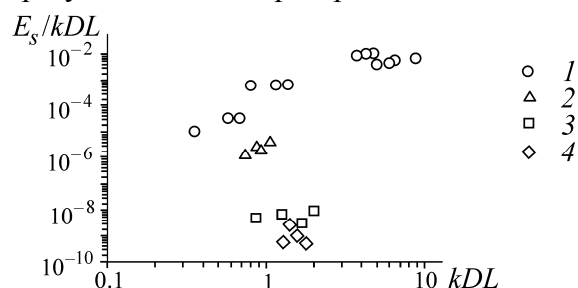


Рис. 6. Зависимость приведенной сейсмической энергии от величины условного сейсмического момента для опытов с различными заполнителями трещины: 1 — кварцевый песок, увлажненный флюидами № 1, 2, 3; 2 — кварцевый песок, увлажненный флюидом № 4 с вязкостью 15 Па·с; 3 — сухая смесь кварцевого песка (70 %) и глины (30 %); 4 — та же смесь, обводненная. Эксперименты проведены при одной и той же жесткости пружины 40 Н/мм

Простейшая слайдер-модель, использованная в экспериментах, не в состоянии воспроизвести процессы, происходящие в реальном породном массиве, однако полученные соотношения между ключевыми параметрами могут быть использованы при построении геомеханических моделей природных объектов.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных лабораторных и численных экспериментов установлено:

- при несущественной вариации предельной прочности трещины изменение вещественного состава материала-заполнителя приводит к радикальному изменению доли энергии, излучаемой в виде сейсмических волн при динамической разгрузке участка породного массива;
- одним из ключевых параметров, определяющим эффективность излучения, является жесткость нарушений сплошности, к которым приурочены сейсмические события. Снижение жесткости разлома (его обводнение, инъекция дилатантных глинистых растворов и пр.) приводит к уменьшению КПД сейсмического источника. И наоборот, нарушение массива в окрестности тектонического разлома приводит к возрастанию приведенной сейсмической энергии;
- для режима прерывистого скольжения хорошее совпадение с экспериментом дает численное моделирование процесса с использованием эмпирической модели "Rate and State". Для событий с малой скоростью распространения разрыва, таких как низкочастотные землетрясения и события медленного скольжения, требуется более детальное рассмотрение соотношения между вкладом кулоновского и вязкого трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г.** Об энергии, излучаемой очагами индуцированной сейсмичности. Ч. I: результаты природных наблюдений // ФТПРПИ. — 2015. — № 4.
2. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / В. Н. Опарин и др.; отв. редактор Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
3. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ярославцев А. Ф., Мирошниченко Н. А., Васильева Е. В.** Эволюция полей напряжений и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
4. **Kocharyan G. G., Markov V. K., Ostapchuk A. A., Pavlov D. V.** Mesomechanics of Shear Resistance along a Filled Crack, *Phys.Mes.*, 2014, Vol. 17, No. 2.
5. **Dieterich J.** Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, *J. Geophys. Res.*, 1979, Vol. 84, No. B5.
6. **Ruina A.** Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, 1983, Vol. 88, No. 6.
7. **Scholz C. H.** Earthquakes and friction laws, *Nature*, 1998, Vol. 391, doi:10.1038/34097.
8. **Kocharyan G. G., Kishkina S. B., Novikov V. A., Ostapchuk A. A.** Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects, *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, Vol. 5 (4).
9. **Kanamori H. and Hauksson E.** A slow earthquake in the Santa Maria Basin, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 1992.
10. **Kocharyan G. G.** Fault zone stiffness as a geomechanical factor controlling the radiation efficiency of earthquakes in the continental crust. *Doklady Earth Sciences*, 2013, Vol. 452, No. 1.

Поступила в редакцию 11/V 2015