

ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ КОНТАКТА МЕЖДУ БЛОКАМИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ХОДЕ ПРЕРЫВИСТОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук, В.К. Марков

Основным результатом работы является экспериментальная оценка характера изменения жесткости межблокового контакта на разных стадиях процесса прерывистого скольжения. Показано, что свойства контакта непрерывно изменяются на протяжении каждого цикла. Нарушенный в процессе динамического срыва контакт упрочняется на стадии относительного покоя, на которой скорость отнок постепенному увеличительного смещения мала. Накопление энергии упругой деформации приводит к снижению скорости скольжения и относительного межблокового перемещения, что в свою очередь вызывает быстрое разупрочнение контакта. Снижение жесткости разломной зоны перед возникновением динамического срыва может оказаться чувствительным индикатором перехода системы в метастабильное состояние.

Введение

Идея приложения закономерностей стик-слипа – прерывистого скольжения к механике землетрясений [Brace, Byerlee, 1966] оказалась исключительно продуктивной и в настоящее время большинство сейсмологов полагают, что коровые землетрясения представляют собой акт скорее фрикционного взаимодействия, чем хрупкого разрушения. Последнее играет вторичную роль в процессах увеличения длины разломов и при фрикционном износе [Scholz, 1998]. Впрочем, на первый взгляд, противоречие между «фрикционной» и «трещинной» гипотезами не столь велико. «Трещинная» и «фрикционная» прочности горных пород на больших глубинах отличаются не очень значительно, а математические соотношения в применяемых моделях часто похожи. Так, например, соотношения, определяющие известную зависимость трения горных пород от времени, смещения и скорости деформации, так называемая «rate and state» модель, идентичны соответствующим уравнениям, описывающим процесс развития трещины при стресс-коррозии [Kanamori, Brodsky, 2004].

Быстрое проскальзывание, сопровождающееся излучением упругих волн и релаксацией накопившихся напряжений, начинается по достижении напряжениями некоторого критического уровня. В простейшей модели стик-слипа до этого момента система находится в равновесии, ее характеристики не меняются, а какие-либо заметные признаки её приближения к критическому состоянию отсутствуют [Rabinowicz, 1965].

Известно, однако, что представление о развитии неустойчивости по достижении некоторого порога является слишком упрощенным [Попов и др., 2010]. Как в

теории трения, так и в теории пластической деформации хорошо известно, что еще до достижения макроскопического предела устойчивости всегда наблюдается ползучесть, связанная как с микроструктурными концентраторами напряжений, так и с термоактивированными концентраторами деформации. При этом скорость ползучести должна резко возрастать в непосредственной близости от порога. В самом деле, для некоторых землетрясений, особенно для событий большой магнитуды, отчетливо выделяется так называемая предсейсмическая стадия, на которой скорость деформации в окрестности будущего очага заметно возрастает [Melbourne, Webb, 2002].

Предсейсмическая деформация неизбежно приводит к изменению механических характеристик среды в окрестности разломной зоны, находящейся на заключительной стадии сейсмического цикла. При этом из-за выраженной нелинейности реологической кривой эти эффекты могут быть весьма значительными [Кочарян, Спивак, 2003; Johnson, Jia 2005]. Удобным параметром, характеризующим эти изменения, является жесткость разломной зоны:

$$k = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial W_i}, \quad (1)$$

где σ_{ik} – соответствующая компонента тензора напряжений, а W_i – составляющая вектора относительного перемещения берегов разлома или трещины. Этот параметр, намного более чувствительный к изменениям деформационных свойств нарушений сплошности, чем эффективная скорость звука (жесткость пропорциональна квадрату скорости распространения волн), может быть рассчитан из результатов сейсмических наблюдений [Кочарян, Спивак, 2003].

Для понимания механики деформационных процессов, происходящих в окрестности очага землетрясения, представляется весьма важным исследовать закономерности развития предсейсмической стадии стик-слипа.

В настоящей работе в простых лабораторных экспериментах детально исследуются закономерности изменения жесткости модельного межблокового контакта на разных стадиях развития динамической неустойчивости.

Постановка опытов и их результаты

Лабораторное исследование процесса прерывистого скольжения проводилось на установке, вид которой схематично представлен на рис. 1. Гранитный блок размером 8×8 см в плане с шероховатой нижней поверхностью устанавливался на шероховатой гранитной подложке. Контакт между поверхностями заполнялся слоем кварцевого песка, слегка увлажненного глицерином (объемное содержание менее 0,1%). Заполнитель имел довольно узкий гранулометрический состав со средним размером зерна около 0,3 мм. Толщина межблокового контакта составляла 2,5 мм.

В ходе эксперимента гранитный блок нагружался постоянной нормальной нагрузкой F_n , которая задавалась в диапазоне от 80 до 1000 Н. Спереди к гранитному блоку крепилась пружина с жесткостью $K = 6,1 \pm 0,7$ Н/мм, которая деформировалась с постоянной скоростью u_s , заданная в диапазоне от 19 до 94 мкм/с. С задней стороны гранитного блока были установлены датчики перемещения типа LVDT, которые измеряли положение гранитного блока с точностью до 1 мкм. Специальные приспособления обеспечивали прямолинейное движение блока без вращения. Для повышения достоверности результатов, каждый опыт повторялся 3÷5 раз.

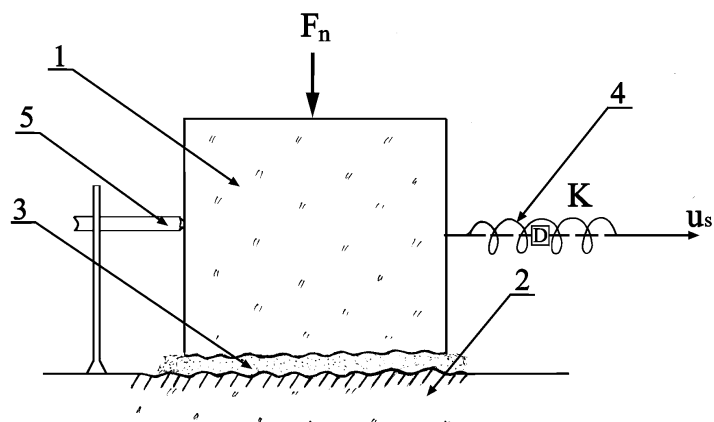


Рис. 1. Установка для исследования явления прерывистого скольжения.
1 – гранитный блок с шероховатой нижней поверхностью; 2 – шероховатая гранитная подложка; 3 – гранулированный наполнитель; 4 – пружина с датчиком силы; 5 – датчики смещения.

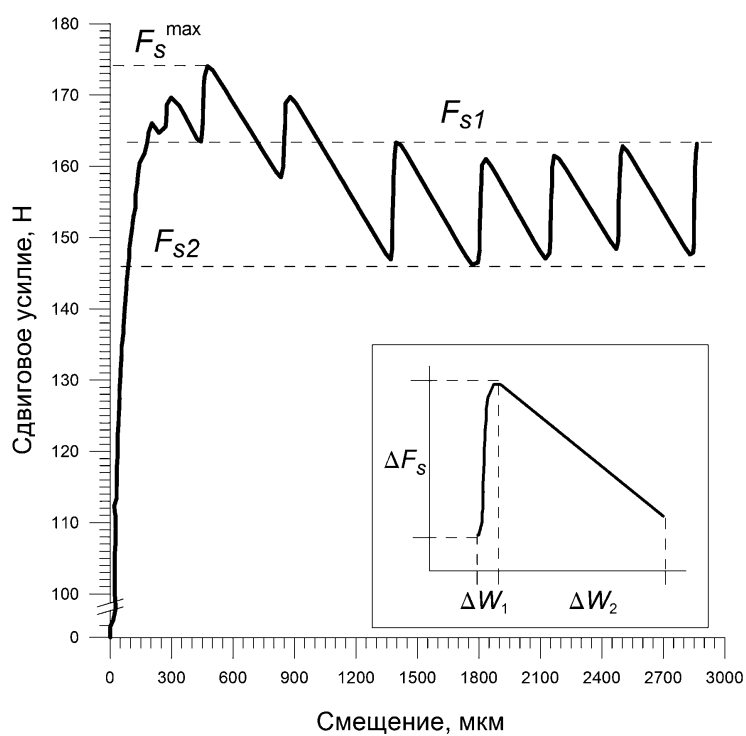


Рис. 2. Типичная картина прерывистого скольжения.
На врезке отдельно показан один цикл процесса.

Типичная картина, наблюдавшаяся в опытах, приведена на рис. 2. При достижении максимального уровня сдвиговой нагрузки, начинаются типичные для подобных опытов вариации фрикционного сопротивления (в некоторых опытах отдель-

ные эпизоды проскальзывания наблюдались и на стадии первичного нагружения). После возникновения динамической неустойчивости происходит резкое проскальзывание с соответствующим сбросом сдвигового усилия. На врезке (рис. 2) показан отдельный период цикла. В качестве контролируемых в экспериментах параметров были выбраны скачок сдвигового усилия ΔF_s , смещения блока: до и после срыва, соответственно, ΔW_1 и ΔW_2 – и сдвиговая жесткость контакта k_s . Для удобства последняя определялась в виде:

$$k_s = \frac{\partial F_s}{\partial W_s}, \quad (1a)$$

где W_s – величина смещения блока относительно подложки.

То есть в отличие от обычного определения жесткости контакта (1), жесткость (1a) имела размерность Н/м.

Скорость снижения нагрузки (наклон заднего фронта зубцов на рис. 2) определяется жесткостью пружины, а амплитуда скачка $\Delta F_s = F_{s1} - F_{s2}$, то есть разница между статическим F_{s1} и динамическим F_{s2} трением, определяется напряженно-деформированным состоянием контакта. Далее процесс происходит повторно – нестабильность сменяется периодом относительного покоя, на протяжении которого происходит накопление напряжений.

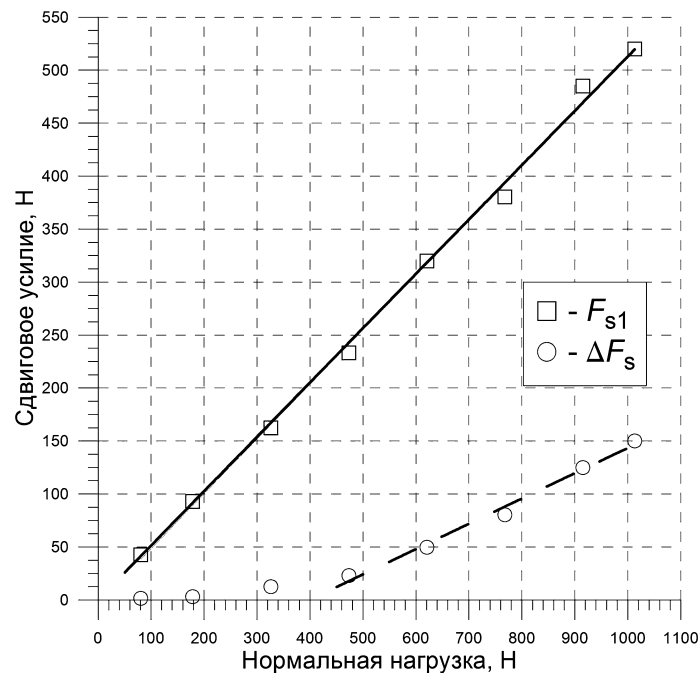


Рис. 3. Зависимость скачка сдвигового усилия (кружки) и остаточного сопротивления сдвигу (квадраты) от нормальной нагрузки.

На рис. 3 показана зависимость величины остаточного сопротивления сдвигу F_{s1} и амплитуды скачка ΔF_s от уровня приложенной нормальной нагрузки. Отметим, что эти параметры не зависят от величины скорости нагружения пружины u_s в исследованном диапазоне параметров. Можно видеть, что, как и следовало ожи-

дать, величина остаточного сопротивления сдвигу с хорошей точностью пропорциональна приложенной нормальной нагрузке. Сплошной прямой line проведена зависимость:

$$F_{s1} = 0,51 \cdot F_n, \quad (2)$$

которая наилучшим образом описывает экспериментальные данные.

Зависимость $\Delta F_s(F_n)$ существенно отклоняется от линейной при малых нормальных нагрузках. Скорее всего, это связано с тем, что заполнитель трещины при малых F_n слабо консолидирован, что приводит к подавлению эффекта прерывистого скольжения [Scholz, 1998].

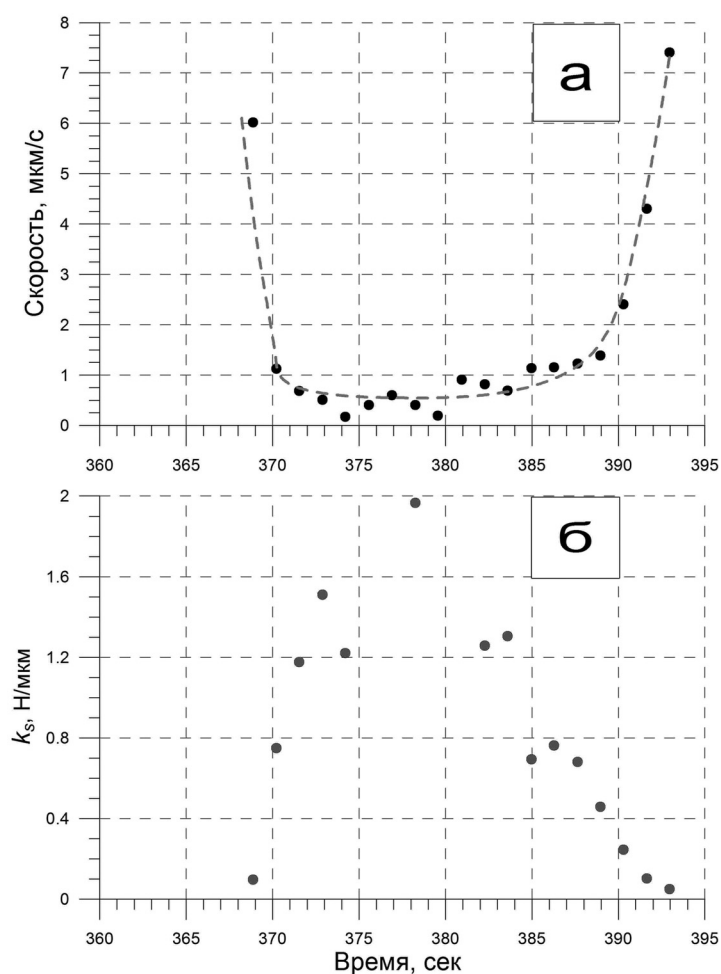


Рис. 4. а) – зависимость скорости блока V_b ; б) – изменение жесткости контакта k_s . $N = 45$ кг, скорость протяжки – 18,81 мкм/с.

В отличие от упрощенных моделей прерывистого скольжения, в которых между участками скольжения (slip) движения нет (stick), блок на протяжении всего цикла непрерывно движется с конечной скоростью $V_b(t)$ относительно подложки (рис. 4). После динамического срыва, максимальная скорость при котором составляет сот-

ни мкм/с, величина V_b менее чем за секунду снижается до нескольких мкм/с. Далее скорость движения медленно снижается, несмотря на рост усилия, прилагаемого со стороны пружины. Поскольку на этой стадии значение V_b существенно ниже скорости нагружения пружины u_s , то тот факт, что этот режим не обусловлен инерциальным движением блока, а связан именно с изменением свойств контакта, показывает простая оценка:

$$\frac{mV_b^2}{2} = \delta \cdot \mu \cdot F_n, \quad (3a)$$

$$\delta = \frac{mV_b^2}{\delta \cdot \mu \cdot F_n} = \left(m = 0,3 \text{ кг}; V_b \approx \frac{10^{-4} \text{ м}}{с}; \mu \approx 0,5; F_n = 450 \text{ Н} \right) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}, \quad (3б)$$

то есть амплитуда инерционного перемещения пренебрежимо мала.

Сдвиговая жесткость контакта (1а) быстро возрастает более чем на порядок (рис. 4, б), достигая максимального значения в конце стадии упрочнения (~378 с на рис. 4), длительность которой составляет порядка 30% от полного времени цикла. После этого жесткость контакта начинает постепенно снижаться, а скорость движения увеличивается вплоть до динамического срыва.

Длина участка, на котором происходит разупрочнение контакта, составляет в опытах с песком величину $15 \div 30$ мкм с тенденцией увеличения с ростом нормальной нагрузки. Зависимость жесткости контакта от величины относительного смещения блоков в одном из циклов показана на рис. 5. Здесь смещение отсчитывается от момента динамического срыва, произошедшего на 368 с рис. 4. Если на стадии упрочнения зависимость $k_s(W_s)$ практически линейна, то при разупрочнении жесткость контакта радикально снижается по мере накопления перемещения ($k \sim W_s^{-4,3}$).

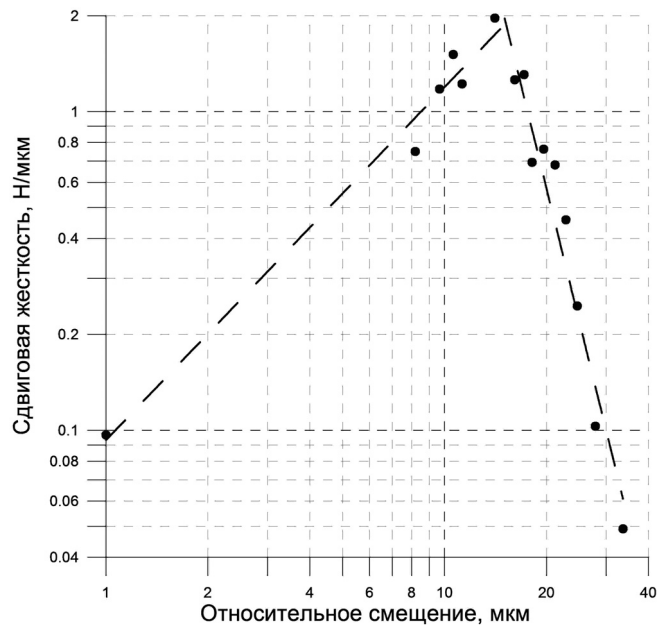


Рис. 5. Зависимость сдвиговой жесткости k_s от относительного смещения блока.

Точка (1 мкм; 0,09 Н/мкм) соответствует точке (369 с; 0,09 Н/мкм) на рис. 4,б.

Оценим, насколько соответствуют характерные параметры нашего контакта типичным.

При рассмотрении прерывистого скольжения обычно пользуются эмпирическими соотношениями, описывающими зависимости силы сопротивления сдвигу от скорости деформации и истории нагружения, наблюдаемые в лабораторных экспериментах. Существует несколько видов подобных соотношений, наиболее известным из которых является закон Дитриха–Руины [Dieterich, 1979; Ruina, 1983]:

$$\frac{F_s}{F_n} = \mu_0 + a \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) + b \ln \left(\frac{V_0 \theta}{D_c} \right), \quad (4)$$

где μ_0 – константа, соответствующая стабильному скольжению со скоростью V_0 , V – скорость смещения, θ – переменная состояния, a , b , D_c – эмпирические константы. Величина θ изменяется со временем и перемещением по определенному закону (эволюционный закон) в процессе перехода контакта к новому стабильному состоянию.

Второе слагаемое в (4) характеризует «мгновенное» увеличение сопротивления трению, а третье – постепенный спад в процессе эволюции контакта.

Анализ уравнения (4) демонстрирует, что условия возникновения фрикционной неустойчивости определяются величиной критического перемещения D_c и, так называемым, фрикционным параметром $(a - b)$, который определяет тип поведения контакта – упрочнение или разупрочнение при возникновении скольжения.

В случае, когда выполняется условие:

$$(a - b) < 0, \quad (5)$$

сопротивление сдвигу снижается по мере увеличения скорости смещения, что, очевидно, необходимо для возникновения неустойчивости или прерывистого скольжения. При этом условие (2) не является достаточным (определенные ограничения накладывает, например, жесткость нагружения).

В состоянии стабильного скольжения:

$$\frac{d\theta}{dt} = 0, \text{ т.е. } \theta = D_c / V, \quad (6)$$

Тогда, из (4) имеем:

$$\frac{F_s}{F_n} = \mu = \left[\mu_0 + a \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) + b \ln \left(\frac{V_0}{V} \right) \right] = \mu_0 + (a - b) \ln \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad (7)$$

Как видно из уравнения (7), при резком изменении скорости движения блока с V_{b1} до V_{b2} , что осуществляется при динамическом срыве, коэффициент трения испытывает скачок:

$$\Delta \mu = (a - b) \cdot \ln \left(\frac{V_{b2}}{V_{b1}} \right), \quad (8)$$

тем самым фрикционный параметр $(a - b)$ будет определяться из реологической кривой по формуле:

$$(a - b) = \frac{1}{F_n} \cdot \frac{\Delta F_s}{\Delta(\ln V_b)}, \quad (8a)$$

Зависимость фрикционного параметра от нормальной нагрузки приведена на рис. 6. При F_n более 50 кПа (до 0,2 МПа) параметр $(a - b)$ уменьшается с ростом

нормальных нагрузок, а материал заполнителя консолидируется, что соответствует результатам [Scholz, 1998]. Величина фрикционного параметра по порядку величины соответствует значениям, наблюдаемых в других работах, например [Попов и др., 2010].

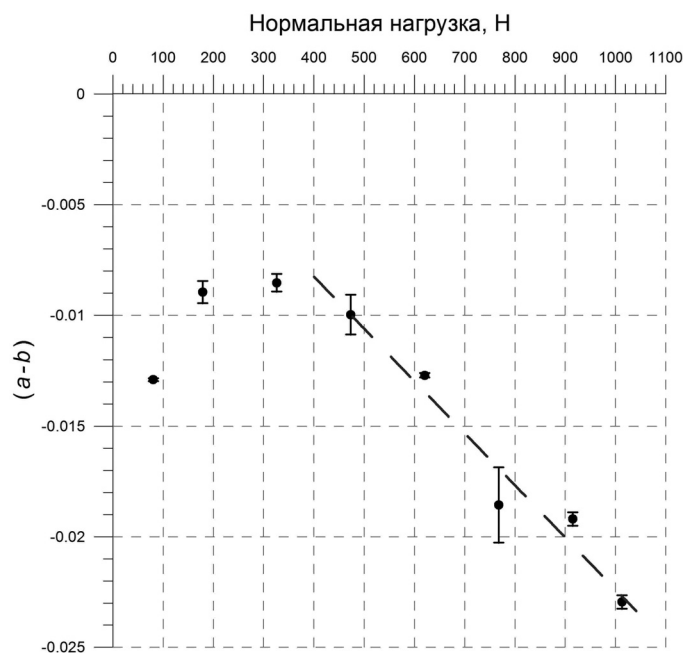


Рис. 6. Зависимость фрикционного параметра $(a - b)$ от нормальной нагрузки.

Обсуждение и выводы

Выполненные опыты продемонстрировали, что в процессе прерывистого скольжения свойства контакта непрерывно изменяются. Нарушенный в процессе динамического срыва контакт упрочняется на стадии относительного покоя, на которой скорость смещения мала. Накопление энергии упругой деформации приводит к постепенному увеличению скорости скольжения и относительного межблокового перемещения, что в свою очередь вызывает быстрое разупрочнение контакта.

Снижение жесткости разломной зоны перед возникновением динамического срыва может оказаться чувствительным индикатором перехода системы в метастабильное состояние.

В наших опытах снижение жесткости трещины перед динамическим срывом составило почти два порядка. Подобное изменение параметров легко могло бы быть зарегистрировано сейсмическими методами [Кочарян, Спивак, 2003], если бы исследуемая зона располагалась вблизи поверхности. Однако предсейсмический слип регистрируется на поверхности лишь при очень крупных землетрясениях. При событиях меньшего масштаба досейсмическое скольжение происходит, вероятно, лишь в окрестности будущего гипоцентра расположенного обычно на значительной глубине. Это делает сейсмическую диагностику таких зон существующими методами весьма затруднительной.

Одним из возможных проявлений снижения жесткости разломной зоны может оказаться появление в спектре микросейсм специфических низкочастотных колебаний. Подобные эффекты наблюдались Г.А. Соболевым и А.А. Любушиным перед несколькими землетрясениями [Соболев, 2011]. Так, примерно за двое суток перед Суматранским землетрясением 2009 года $M_{9,2}$ на ряде станций синхронно проявились колебания с частотой $\sim 0,005 \div 0,007$ Гц. По мере приближения землетрясения частота этих колебаний снижалась, достигнув непосредственно перед землетрясением величины $\sim 0,0016$ Гц.

Могут ли подобные явления быть связаны с рассматриваемым нами эффектом снижения жесткости разломной зоны перед динамическим срывом?

В работе [Кочарян, Кабыченко, 2003] рассмотрена модель возникновения собственных колебаний блока земной коры на прослойке – разломной зоне. Показано, что характерная частота таких колебаний может быть оценена как

$$f \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{\rho L}} \cong \frac{1}{L^{0.71}} \text{ Гц}, \quad (6)$$

где L – характерный размер блока, км; ρ – плотность, k_s – сдвиговая жесткость разломной зоны.

При выводе оценки (6) использовано выражение для жесткости разломной зоны

$$k_s \cong 100 \cdot L^{-0.41} \text{ МПа/м}, \quad (7)$$

полученное на основе результатов «in situ» измерений жесткости разломов разного масштаба [Кочарян, Спивак, 2003].

Полагая, для примера, $L = 50 \div 100$ км, получаем из (6) период таких колебаний $T_0 \sim 15 \div 25$ с. При снижении жесткости разлома перед динамическим срывом в 100 раз, получаем уже $T_1 \sim 150 \div 250$ с.

Основным результатом данной работы является количественная экспериментальная оценка характера изменения жесткости межблокового контакта в ходе прерывистого скольжения. Понимая всю условность переноса полученных результатов на натуру, мы, тем не менее, полагаем возможным предположить наличие подобных явлений и в природе. Если это так, то эффект снижения жесткости разломной зоны перед землетрясением может оказаться основой для разработки новых активных и пассивных методов мониторинга сейсмоактивных регионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-01064-а) и ОНЗ РАН (программа № 6).

Литература

Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.

Кочарян Г.Г., Кабыченко Н.В. Проявление блоковых движений в длиннопериодном сейсмическом фоне / Сборник научных трудов ИДГ РАН. 2003. С. 98–107.

Попов В.Л., Grzemba B., Starcevic J., Farbu C. Ускоренная ползучесть как предвестник фрикционной неустойчивости и проблема предсказания землетрясений // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 5. С. 85–89.

Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. – М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.

- Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as a Mechanism for Earthquakes // *Science*. 1966. V. 153. P. 990–992.
- Dieterich J.H.* Modeling of Rock Friction. 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.* 1979, V. 84, P. 2161–2168.
- Johnson P., Jia X.* Nonlinear dynamic, granular media and dynamic earthquake triggering // *Nature*. 2005. 437, pp. 871–874.
- Kanamori H., Brodsky E.* The physics of earthquakes // *Rep. Prog. Phys.* 2004. 67. P. 1429–1496.
- Melbourne T.I., Webb F.H.* Precursory transient slip during the 2001Mw = 8.4 Peru earthquake sequence from continuous GPS // *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29(21), 2032, doi:10.1029/2002GL015533.
- Rabinowicz E.* Friction and Wear of Materials. New York: Wiley. 1965. p. 315.
- Ruina A.L.* Slip instability and state variable friction laws // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88, p. 10359–10370.
- Scholz C.H.* Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. V. 391, p. 37–42.