

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ УДАЛЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Е.А. Виноградов

Нами предлагается к рассмотрению возможный феноменологический механизм изменения режима деформирования межблокового контакта в результате прохождения сейсмических волн от удаленных событий. Работа преимущественно базируется на опубликованных в российской и зарубежной литературе материалах по накоплению слабых деформаций и изменению проницаемости контакта в результате сдвиговой деформации среды. Кратко приводятся результаты экспериментального исследования вариаций проницаемости контакта в результате дилатансии. Предлагаемый механизм может служить одним из возможных объяснений отложенной триггерной инициации сейсмических событий на разломах, окружающих очаг крупных землетрясений.

Введение

В последние годы внимание многих исследователей в области изучения тектонических процессов и механизмов в очагах землетрясений обращено на различные режимы деформирования на межблоковых контактах. Помимо хорошо известных быстрых подвижек, то есть землетрясений, и квазистабильного асейсмического скольжения, по которому также накоплен значительный наблюдательный материал, в настоящее время ученые выделяют новые, переходные режимы, такие как «низкочастотные землетрясения», «очень низкочастотные землетрясения», «явления медленного скольжения». В работе [Peng, Gombert, 2010] авторы делают предположение, что разноскоростные явления скольжения по разлому образуют континуум, и конкретный механизм реализации того или иного режима деформирования определяется не только напряженно-деформированным состоянием массива, но и структурными характеристиками самого разлома. Экспериментально было установлено, что скорость деформирования контакта существенно зависит от его материала-заполнителя [Кочарян и др., 2013; 2015]. В частности, в работе [Кочарян, Остапчук, 2015] показано, что существенное влияние на режим деформирования может оказывать присутствие жидкости в контакте, причем даже незначительное ее количество способно увеличивать скорость подвижки по контакту на порядки. В работах [Leclerc et al., 2016; Proctor, Hirth, 2015] приводятся свидетельства того, что поровое давление флюида в разломе может влиять на его жесткость и, как следствие, на режим скольжения.

В данной работе на основании анализа описанных в мировой литературе результатов лабораторных и численных экспериментов предлагается возможный механизм изменения деформационного режима разлома в результате воздействия волн удаленного землетрясения и вызванного им притока жидкости в разлом. Предложенный механизм представляется важным для понимания природы инициации сейсмических событий, в том числе в областях, ранее считавшихся асейсмичными.

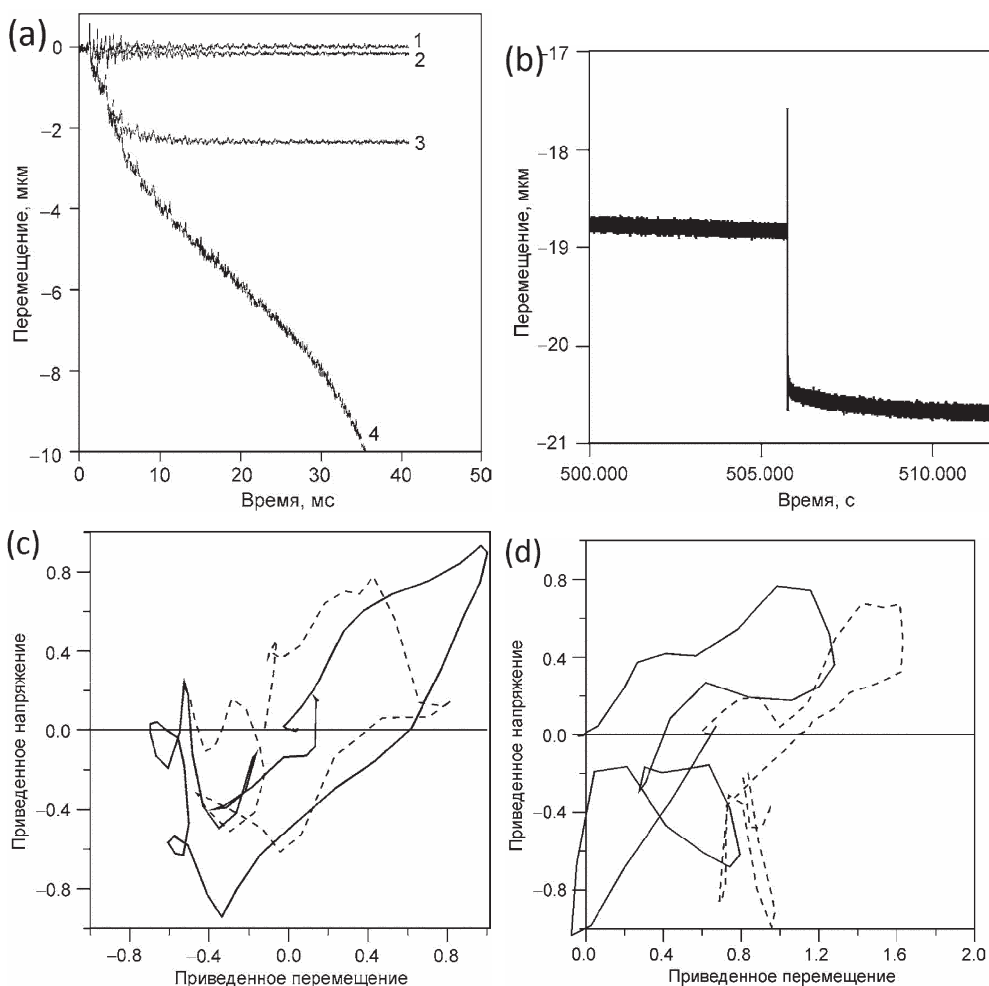


Рис. 1. Результаты эксперимента по накоплению межблоковых деформаций (приводится по [Кочарян и др., 2004]). а, б – эпюры межблоковых колебаний, зарегистрированные в опытах. (1) $\tau_S / \tau_{p0} = 0$; (2) $\tau_S / \tau_{p0} = 0,05$; (3) $\tau_S / \tau_{p0} = 0,5$; (4) $\tau_S / \tau_{p0} = 0,99$. с, d – экспериментальные зависимости напряжение-межблоковое перемещение.

(с) – $\tau_S / \tau_{p0} = 0$; (d) – $\tau_S / \tau_{p0} = 0,5$.

Сплошная линия – первый цикл динамической нагрузки, пунктир – второй

Накопление деформаций на контакте в результате динамического воздействия

Рассмотрим межблоковый контакт, находящийся в напряженном состоянии, то есть с высоким нормальным σ_n и сдвиговым τ_S напряжениями. Пусть межблоковое пространство содержит заполнитель с небольшим количеством жидкости, находящейся под давлением p . Тогда выполняется известное соотношение в виде модифицированного закона Кулона-Мора:

$$\tau_c = C + (\sigma_n - p) \cdot f \quad (1),$$

где C – сцепление горных пород, f – коэффициент межблокового трения, τ_c – критическое напряжение сдвига, при достижении которого возможно движение по контакту. Реакция контакта, находящегося в напряженном состоянии, на прохождение сейсмических волн существенно зависит от отношения сдвигового и нормального напряжений. При близости сдвиговых напряжений на контакте к критическому значению возможны кратковременные «проскальзывания» по контакту, обусловленные так называемой акустической флюидизацией – вариациями давления акустического поля по отношению к постоянному литостатическому давлению [Melosh, 1979].

В серии работ [Кочарян и др., 2004; 2005; 2006] приведены результаты экспериментальных исследований, в которых удалось показать возможность накопления малых деформаций на разломе. В результате динамического воздействия на межблоковый контакт, находящийся в напряженно-деформированном состоянии, отмечалось смещение по контакту, причем амплитуда смещения зависела от отношения нормального и сдвигового напряжения (рис. 1).

Уже незначительное повышение сдвиговой нагрузки приводит к неупругому смещению блока вдоль основания, тогда как при ее отсутствии остаточных смещений не наблюдается. Вывод подтверждается диаграммами «напряжение-перемещение» двух циклов динамической нагрузки при отсутствии (рис. 1, в) и наличии (рис. 1, г) поля внешних сдвиговых усилий в начальный момент – гистерезисные петли «замкнуты» и «открыты» соответственно.

Авторы предлагают следующий механизм, позволяющий объяснить наблюдаемые явления. При прохождении динамической нагрузки нормальные напряжения возрастают в момент фазы сжатия, а затем снижаются по сравнению с уровнем статических напряжений. Таким образом, в каждый момент времени соотношение τ_s / τ_p меняется и даже может превысить критическое значение $\tau_s / \tau_p = 1$. В момент времени, когда сдвиговые усилия превышают сдвиговую прочность контакта, блок начинает смещаться вдоль его плоскости. Чем ближе начальное значение τ_s / τ_{p0} к единице, тем более длительными становятся интервалы проскальзывания в ходе каждого цикла колебаний и тем больше интегральное смещение.

Интегральная сдвиговая деформация в результате прохождения n циклов колебаний в заданной постановке эксперимента:

$$\gamma_n = \frac{\Delta_n}{W} \sim 0,1 \alpha n \left(\frac{V_m}{C_s} \cdot 10^5 \right)^{1,8} \quad (2)$$

где Δ_n – остаточное перемещение после n циклов, W – апертура контакта, V_m – максимальная скорость смещения в волне, C_s – скорость распространения поперечных волн. Коэффициент α , определяемый напряженно-деформированным состоянием системы, вводится для учета того, что в ходе цикла нагрузка-разгрузка-нагрузка остаточные смещения будут частично компенсировать друг друга, но при этом интегральное смещение будет направлено в сторону действия сдвигового напряжения. В описанных экспериментах параметр α изменялся от 0,04 при $\tau_s / \tau_{p0} \sim 0,5$ до 0,8 при $\tau_s / \tau_{p0} \sim 0,99$.

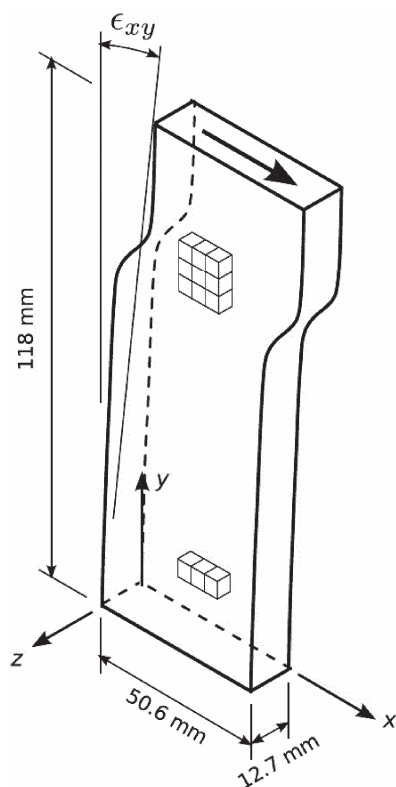


Рис. 2. Схема численного моделирования дилатансии массива в результате сдвига.
Приводится по [Sun et al., 2013]

В зависимости от начального напряженно-деформированного состояния контакта и его реологии, а также от интенсивности и числа колебаний в падающей волне, может наблюдаться как срыв контакта с диссипацией накопленной энергии деформирования, так и его остановка после определенного уровня остаточной деформации [Кочарян и др., 2006].

Изменение гидрогеологических свойств контакта в результате сдвиговой деформации

Известно, что в результате дилатансии, вызванной сдвиговой деформацией контакта, его проницаемость может существенно измениться. Численное моделирование этого процесса подробно приводится, например, в [Sun et al., 2013]. Авторы рассматривают прямоугольный параллелепипед размером $50,6 \times 118 \times 12,7$ мм, состоящий из 129000 сферических частиц, находящийся в условиях всестороннего сжатия; диаметр частиц распределен около среднего значения $D = 1$ мм. Направление сдвигового воздействия с постоянной скоростью осуществляется в центральной части блока перпендикулярно одной из граней (см. рис. 2). Результаты моделирования [Sun et al., 2013] приведены на рис. 3. Можно видеть суще-

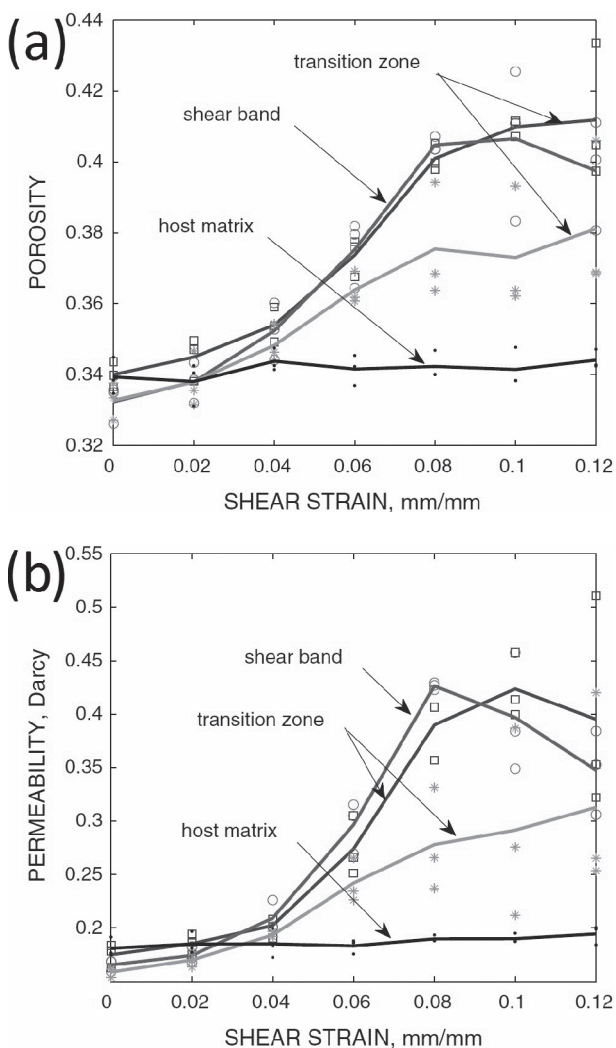


Рис. 3. Увеличение пористости (а) и проницаемости (б) зоны сдвига (полые кружки), неповрежденного массива (точки) и нижней (звездочки) и верхней (квадраты) части промежуточной зоны в ходе численного эксперимента по сдвиговой деформации в массиве. Приводится по [Sun et al., 2013]

ственный рост пористости и проницаемости зоны сдвига уже при сдвиговой деформации 0,08–0,1. Помимо существенного роста проницаемости и пористости авторы отмечают значимый рост скорости течения жидкости в зоне сдвига по сравнению с окружающим массивом.

Оценим из (2) интенсивность колебаний в падающей сейсмической волне, достаточную для существенного изменения проницаемости в результате инициированной ими сдвиговой деформации. Рассмотрим разлом, находящийся в состоянии близком к критическому, то есть $\tau_S / \tau_{p0} \sim 0,99$. Тогда для деформации

$\gamma_n = 0,08$ мм/мм с учетом $\alpha = 0,8$ и $c_s \approx 2,2$ км/с для числа колебаний $n = 200$ получим $V_m \sim C_s \cdot \sqrt[1.8]{\frac{10\gamma_n}{\alpha n}} \cdot 10^{-5} \approx 1,2$ мм/с. Магнитуду и расстояние до очага землетрясения можно оценить из соотношения

$$V_m \sim 0,0012 \cdot \frac{10^M}{R^{1.5}}, \quad (3)$$

где максимальная скорость в волне V_m указывается в см/с, а эпицентральное расстояние R – в км [Кочарян и др., 2011]. Скорость $V_m \sim 1$ мм/с будет регистрироваться на расстоянии 3000 км от землетрясения магнитудой $M = 7$ или на расстоянии 500 км от землетрясения магнитудой $M = 6$. Тем самым на основании вышесказанного можно утверждать, что прохождение сейсмических волн довольно сильных, но все же не исключительных, землетрясений способно при определенных условиях вызывать значимое изменение проницаемости и пористости в разломах, удаленных от очага землетрясения на большое расстояние.

Лабораторные эксперименты, направленные на оценку возможного изменения проницаемости межблокового контакта в результате сдвигового деформирования, были проведены в ИДГ РАН. В ходе эксперимента измерялась проницаемость контакта шириной 2 мм между двумя блоками, изготовленными из гипосульфита с примесью гранитной крошки. Поверхности блоков, являющиеся границами нарушения сплошности, были шероховатыми с характерным размером шероховатости $d \approx 0,32$ мм. По периметру нарушение оклеено тканью, удерживающей наполнитель, но не препятствующей выходу воздуха и достаточному относительному смещению блоков. В качестве наполнителя использовалась гранитная крошка различного гранулярного состава в диапазоне размеров 0,05–2,5 мм. В качестве рабочего тела для измерения проницаемости использовался воздух, что позволяло исключить влияние на реологию контакта в ходе эксперимента.

На рис. 4 приведены результаты измерений проницаемости в зависимости от сдвиговой деформации на контакте. Можно видеть, что проницаемость резко возрастает уже при относительно небольших деформациях $\gamma \sim 0,1 \div 0,2$, изменение проницаемости трещины довольно значительно и составляет величину порядка 10÷15%. Максимальное увеличение проницаемости достигает 60% при деформации сдвига $\gamma \sim 1$.

Возможный механизм изменения режима деформирования

Рост пористости и проницаемости межблокового контакта приводит к падению порового давления в межблоковой зоне и, согласно (1), остановке скольжения по контакту – смещению круга Мора вправо. Одновременно с этим начинается приток жидкости в область низкого давления. В первую очередь, это инфильтрационная жидкость из окружающего массива, ранее находившегося в состоянии гидростатического равновесия с контактом, а также, возможно, ранее связанная жидкость, освобождающаяся за счет дегидратации минералов, составляющих приразломную зону [Leclerc et al., 2016]. Переток жидкости во вновь открывшиеся поры со временем восстановит поровое давление до начального уровня, то есть круг Мора вернется в состояние, вновь делающее возможным

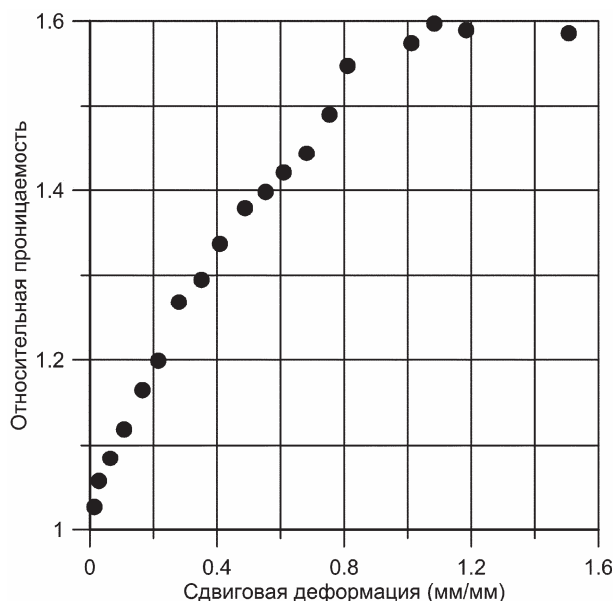


Рис. 4. Результаты эксперимента по изменению проницаемости межблокового контакта в результате сдвиговой деформации

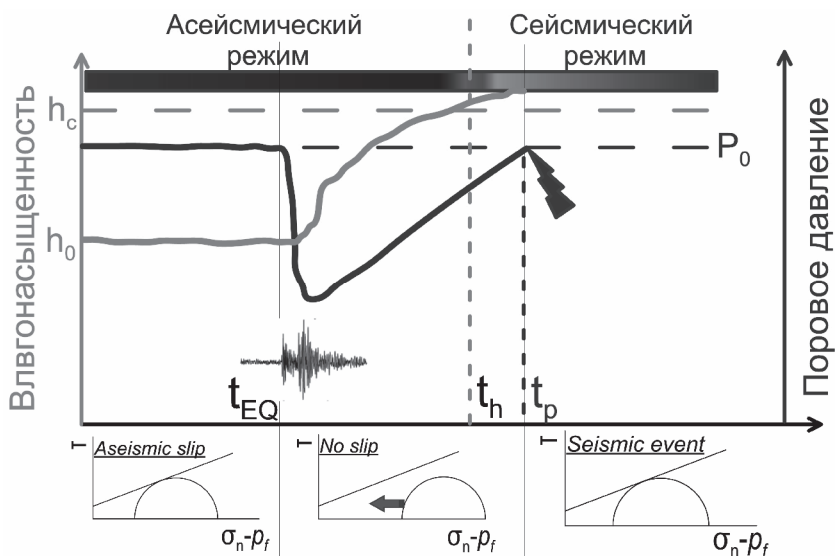


Рис. 5. Схематическое изображение механизма изменения режима деформирования контакта в результате прохождения сейсмической волны.

Линии: темная – поровое давление в межблоковой зоне, светлая – влагонасыщенность межблоковой зоны, t_{EQ} – момент прихода внешней сейсмической волны, t_h – момент достижения влагонасыщенности h_c , при которой движение по контакту возможно в виде сейсмического срыва, t_p – момент полного восстановления порового давления, начало движения по контакту

движение по разлому. При этом общая влагонасыщенность контактной зоны окажется выше за счет поступившей жидкости.

Лабораторные эксперименты [Кочарян, Остапчук, 2015] демонстрируют, что даже минимальное количество жидкости (порядка 0,5% по массе), добавленное в сухой песок, выступающий в роли заполнителя контакта, способно кардинально изменить режим деформирования контакта, переведя его из стабильного скольжения в стик-слип. То есть, в момент восстановления порового давления начавшееся движение по разлому произойдет скачкообразно, в виде сейсмического срыва¹.

Предлагаемый механизм перехода движения по контакту из асейсмического режима в сейсмический в результате прохождения волны схематически представлен на рис. 5.

Заключение

В работе предложен возможный механизм изменения режима деформирования межблокового контакта, находящегося в напряженно-деформированном состоянии, в результате прохождения сейсмических волн от удаленного воздействия. Слабые колебания границ контакта могут привести к довольно значительной сдвиговой деформации без разряджения напряжений, что, в свою очередь, повышает проницаемость и пористость контакта и, за счет падения порового давления, ведет к притоку жидкости из окружающего массива, одновременно останавливая процесс асейсмического скольжения. После восстановления порового давления в межблоковой зоне дальнейшее движение по разлому будет происходить в виде не асейсмического скольжения, а стик-слипа, что обуславливается более высокой влагонасыщенностью межблоковой зоны. Тем самым, можно говорить о том, что сейсмическая волна, останавливая стабильное скольжение по разлому и выводя систему из гидростатического равновесия, как бы «взводит курок», после чего приток жидкости в разлом «заряжает» его и сейсмический срыв становится лишь вопросом времени.

Отметим, что предложенный механизм может служить объяснением отложенному триггерному механизму инициации афтершоков и независимых сейсмических событий на разломах, окружающих очаг крупных землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694) и Российской академии наук (проект № 0146-2015-0012).

Литература

Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.

Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 5–22.

¹ На самом деле в работе [Кочарян, Остапчук, 2015] утверждается, что функция максимальной скорости смещения по разлому от влагонасыщенности может принимать непрерывный спектр значений от стабильного скольжения до стик-слипа. Однако, поскольку рост максимальной скорости смещения по разлому происходит довольно быстро (на порядок за сотые доли процента увеличения влагонасыщенности), в рамках предлагаемого в настоящей работе феноменологического механизма мы говорим о дискретном наборе «сейсмическое-асейсмическое движение».

Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Павлов Д.В. Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 1. С. 23–36.

Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9, № 1. С. 5–14.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, № 5. С. 5–15.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В. и др. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть II: полевые эксперименты и феноменологическая модель явления // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18, № 6. С. 75–85.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Влияние вязкости тонких пленок флюида на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // Докл. РАН. 2015. Т. 463, № 3. С. 343–346.

Leclerc H., Faulkner D., Wheeler J., Mariani E. Permeability control on transient slip weakening during gypsum dehydration: Implications for earthquakes in subduction zones // Earth Planet. Sci. Lett. 2016. Vol. 422. P. 1–12.

Melosh H.J. Acoustic fluidization: a new geologic process? // J. Geoph. Res. 1979. Vol. 84, № B13. P. 7513–7520.

Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. 2010. Vol. 3. P. 599–607.

Proctor B., Hirth G. Role of pore pressure on transient strength changes and fabric development during serpentine dehydration at mantle conditions: Implications for subduction-zone seismicity // Earth Planet. Sci. Lett. 2015. Vol. 421. P. 1–12.

Sun W., Kuhn M.R., Rudnicki J.W. Acta Geotech. 2013. Vol. 8. P. 465. Doi:10.1007/s11440-013-0210-2.