

УДК 550.34; 622.83

**ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛОМА
В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНЖЕКЦИИ ФЛЮИДА**

Г. Г. Кочарян^{1,2}, А. А. Остапчук^{1,2}, В. С. Мартынов^{1,2}

¹Институт динамики геосфер РАН, E-Mail: gevorgkidg@mail.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер. 9, 141700, г. Долгопрудный, Россия

Приведены первые результаты экспериментов, направленных на исследование влияния инъекции флюида на режим деформирования межблокового контакта. Установлено, что доля энергии деформирования, идущая на излучение сейсмической волны, в значительной степени зависит от параметров флюида, закачиваемого в трещину. Наиболее эффективным для снижения сейсмической энергии оказывается использование дилатантной жидкости, вязкость которой увеличивается с ростом скорости деформирования. В лабораторном эксперименте режим прерывистого скольжения трансформировался в квазистабильный крип спустя один цикл деформирования после окончания закачки.

Техногенно-тектонические землетрясения, разлом, режим скольжения, инъекция флюида, снижение сейсмической опасности, лабораторный эксперимент

Известно, что инъекция флюида в массив горных пород часто изменяет сейсмический режим локального участка коры. Как правило, даже в районах, считающихся асейсмичными, происходит заметное увеличение количества сейсмических событий малых энергетических классов, коррелирующего с объемом закачиваемой жидкости [1]. В некоторых случаях закачка воды в недра приводит к довольно значительным землетрясениям, вплоть до магнитуд свыше 5 [2]. Неглубокое расположение очагов таких событий обуславливает возможность возникновения существенных повреждений зданий и инженерных сооружений. В то же время известны проекты, направленные на снижение уровня сейсмической опасности путем уменьшения энергии отдельных событий при увеличении их количества [3]. Неприемлемость подобного подхода из-за слишком большого количества малых землетрясений, необходимых для реализации запасенной в массиве энергии, неоднократно отмечалась в литературе [4, 5]. Более привлекательной представляется идея трансформации режима деформирования разлома через техногенное изменение фрикционных свойств зоны скольжения.

Влияние закачки флюида на режим деформирования обычно рассматривается на основе эффекта снижения эффективной прочности трещин при увеличении порового давления. Лабораторные эксперименты показали, что вид скольжения определяется соотношением между сдвиговой жесткостью разлома k_s и жесткостью вмещающего массива K [6]. Поскольку величина K

изменяется незначительно, главным параметром, определяющим эффективность подвижки по разлому как излучателя сейсмических колебаний, является k_s или, точнее, скорость снижения сопротивления сдвигу в процессе относительного смещения берегов. Этот параметр может существенно меняться при небольших вариациях структуры зоны магистрального сместителя разлома и свойств слагающих ее материалов [6].

Высокая степень изученности массивов горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых, использование геомеханических моделей [7–10] дает возможность обоснованного выбора разломных зон, потенциально опасных с точки зрения возникновения крупных техногенно-тектонических землетрясений [11]. Разработка способов изменения режимов скольжения небольших разломов, в отличие от попыток предотвращения крупных тектонических землетрясений, представляется реальной, хотя и весьма сложной научной и инженерной задачей, требующей проведения лабораторных и полевых экспериментальных исследований.

Ниже анализируются опубликованные результаты наблюдений за эффектом инъекции флюида в массив горных пород. Эти данные послужили стимулом для проведения лабораторных экспериментов по исследованию свойств закачиваемой жидкости на режим деформирования межблокового контакта, первые результаты которых приведены в настоящей статье.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДАЛЬНОДЕЙСТВИИ ЭФФЕКТА ИНЖЕКЦИИ ФЛЮИДА В СКВАЖИНУ

Изменения вещественного состава геоматериала в зоне скольжения, степени обводненности, свойств флюида, порового давления, уровня литостатических напряжений приводят к тому, что различные участки разломов могут обладать разной жесткостью. В масштабе коры это проявляется в том, что иногда в одном и том же регионе регистрируются разные типы скольжения. Так, на разломах в северо-восточной части Японии накопленная энергия деформации реализуется в виде крупных землетрясений, постсейсмического скольжения большой амплитуды и крупных событий медленного скольжения. В локальном масштабе участка массива горных пород, вмещающего горнодобывающее предприятие, деформации, изменения напряженного состояния или свойств геоматериала, происходящие на одном из сегментов гетерогенной разломной зоны, неизбежно сказываются на режиме скольжения соседних участков, а иногда и разлома в целом.

Одной из важных проблем является оценка “дальнодействия” эффекта инъекции флюида. Прямых измерений, проливающих свет на то, каким образом влияют друг на друга участки с различными режимами скольжения, практически нет. Можно обнаружить лишь косвенные свидетельства подобного взаимодействия.

В явном виде инициирование динамических срывов медленным скольжением наблюдалось в натурном эксперименте при проведении инъекции флюида в скважину глубиной 518 м, пройденную в массиве известняка [12]. Скважина пересекла зону разлома, состоящую из нескольких трещин, разделенных микробрекцией. Кумулятивное смещение по разлому составляет несколько метров.

Участок скважины длиной около 1.5 м, пересекавшей разлом, ограничен пакерами, и в него нагнеталась вода под последовательно увеличивающимся давлением. При этом контролировалось перемещение по разлому и проводились сейсмоакустические измерения. Некоторые результаты измерений показаны на рис. 1.

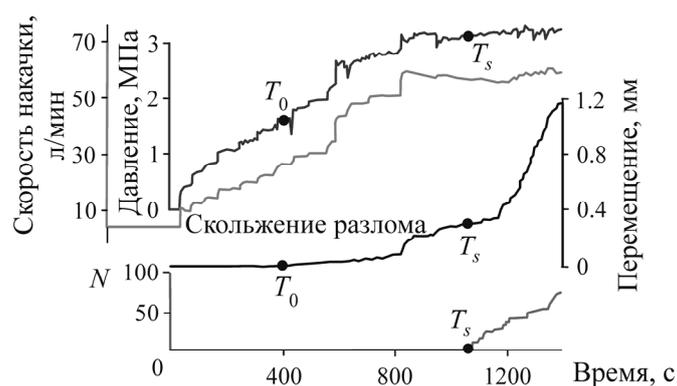


Рис. 1. Результаты регистрации параметров деформирования разломной зоны при инъекции флюида (по [12]): T_0 — момент начала скольжения по разлому, T_s — момент возникновения первых микроземлетрясений; N — количество сейсмических событий

Смещение по разлому началось через 400 с после начала инъекции флюида при давлении 1.5 МПа и достигло 1.2 мм в конце эксперимента. В течение времени от 400 до 1100 с происходило постепенное увеличение скорости смещения по разлому, среднее значение которой составило на этой стадии около 0.4 мкм/с. Смещение по разлому равнялось 0.3 мм. В момент времени около 1100 с зафиксированы первые сейсмические события. Полное количество зарегистрированных микроземлетрясений — около 80, причем более половины из них зарегистрированы на стадии, когда скорость скольжения была невелика. Резкое увеличение скорости скольжения до 23 мкм/с не привело к увеличению количества микроземлетрясений в единицу времени. Величина суммарного сейсмического момента, реализованного через микросейсмичность, оказалась менее чем 10^6 Н·м, тогда как сейсмический момент медленного скольжения был выше более чем на 4 порядка $\sim 6.5 \cdot 10^{10}$ Н·м. Оцененный в [12] радиус зоны изменения порового давления составил около 10 м, а максимальный радиус зоны скольжения превысил в конце эксперимента 35 м. Интересно, что динамические срывы начали происходить лишь после того, как размер зоны скольжения превысил радиус зоны повышенного в результате закачки порового давления.

Влияние закачки флюида на инициирование деформационных событий на разломах более крупного масштаба описано в [2]. Проведенный анализ разнообразных данных — записей широкополосных сейсмоприемников, датчиков сильных движений, геодезических наблюдений и т. д. позволил выявить детальную картину сейсмогенных и асейсмичных деформационных событий, связанных с закачкой флюида на геотермальном поле вблизи г. Brawley в Южной Калифорнии. Показано, что ряд событий начался с асейсмического скольжения по неглубокому сбросу Morelia Fault, расположенному под геотермальным полем (глубина закачки флюида около 1.5 км). Параллельно наблюдалось многократное увеличение количества небольших землетрясений, очаги которых располагались на глубине 5–7 км. При этом количество событий с глубокими гипоцентрами (8–12 км) оставалось на прежнем уровне. В 2012 г. произошел рой крупных землетрясений — 5 событий (M3.9; M5.4; M5.3; M4.7 и M4.3) в течение 10 ч. Два последних землетрясения зафиксированы на глубине около 2 км на разломе Morelia Fault и интерпретированы как следствие медленного скольжения, инициированного инъекцией флюида. Кумулятивная амплитуда медленного смещения по разлому достигала примерно 50 см. Большая глубина остальных трех землетрясений (более 6 км), которые произошли на другом разломе сдвигового типа, расположенном в непосредственной близости от геотермального поля, не позволяет установить однозначную связь с событиями медленного скольжения по сбросу Morelia Fault. Авторы [2] оставляют открытым вопрос, могли бы эти землетрясения рано или поздно произойти без техногенного вмешательства.

Приведенные примеры показывают, что зона скольжения, инициированного инъекцией флюида по разлому, распространяется на несколько характерных размеров участка изменения порового давления. При этом размер зоны влияния инициированного процесса медленного скольжения может быть существенно больше. Этот вывод сделан по результатам инъекции флюида как одиночной скважиной непосредственно в зону разлома, так и при нагнетании жидкости многими скважинами в значительном объеме массива.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Одной из конструктивных идей, направленных на изменение режима деформирования разломной зоны, является инъекция в зону разлома не воды, а дилатантных жидкостей, например глинистых растворов, вязкость которых изменяется с ростом скорости деформации [4, 5]. Поскольку в большинстве случаев зона разлома бывает увлажнена, проведены несколько серий лабораторных экспериментов, в которых изучалась эволюция процесса межблокового скольжения при изменении свойств увлажняющего флюида.

Экспериментальный стенд представлял собой трибологическую установку в постановке “слайдер” — модели, в которой блок под действием сдвигового усилия скользит вдоль поверхности подложки. Схематично установка представлена на рис. 2. Блок из оргстекла B размером $8 \times 8 \times 3 \text{ см}^3$ располагался на неподвижном основании из того же материала. Высота шероховатости поверхности блоков составляла $\sim 0.5 \text{ мм}$. Контакт между блоками заполнялся тонким слоем гранулированного заполнителя S толщиной около 3 мм . В качестве заполнителя использовалась увлажненная разными флюидами смесь кварцевого песка с размером гранул $200\text{--}315 \text{ мкм}$ и шамотной глины $1\text{--}50 \text{ мкм}$. Начальная массовая доля флюида в материале-заполнителе 5% . Процессами испарения флюида за время проведения опыта можно пренебречь.

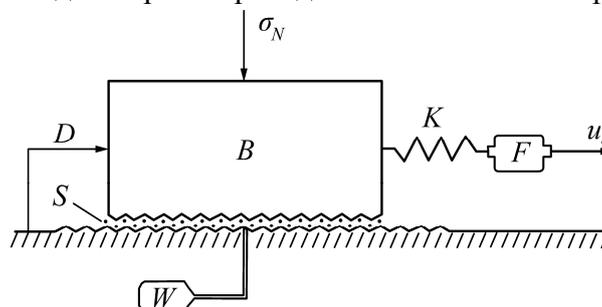


Рис. 2. Схема проведения лабораторных экспериментов

В процессе деформирования нормальное напряжение σ_N составляло 125 кПа , а сдвиговое усилие прикладывалось через пружину K с жесткостью 60 кН/м , которая деформировалась с постоянной скоростью u_s , равной 5 или 20 мкм/с . Создаваемые сдвиговые усилия контролировались пьезодатчиком силы F CFT/5kN, а динамика относительного перемещения блоков — лазерным датчиком перемещения D ILD2220-10 (рабочая полоса частот $0\text{--}5 \text{ кГц}$, точность измерения 0.1 мкм).

В экспериментах с инъекцией флюид подавался из резервуара W через два специальных канала диаметром 1 мм , которые располагались под центром подвижного блока на расстоянии 3 см друг от друга. Измерения показали, что при $\sigma_N = 125 \text{ кПа}$ для кварцевого песка характерно скоростное разупрочнение — снижение сопротивления сдвигу при увеличении скорости скольжения. При использовании в качестве заполнителя шамотной глины наблюдается скоростное упрочнение — увеличение сопротивления сдвигу с ростом скорости скольжения.

Использование в качестве заполнителя песчано-глинистой смеси с различным содержанием глины позволяет реализовывать полный спектр возможных режимов сдвигового деформирования контакта между блоками — от стабильного скольжения с примерно постоянной скоростью, равной скорости движения конца пружины u_s , до прерывистого скольжения, т. е. регулярно повторяющихся быстрых динамических срывов [5]. Примеры различных деформационных событий (актов проскальзывания со скоростью > 20 мкм/с), реализованных в описываемой серии экспериментов, представлены на рис. 3.

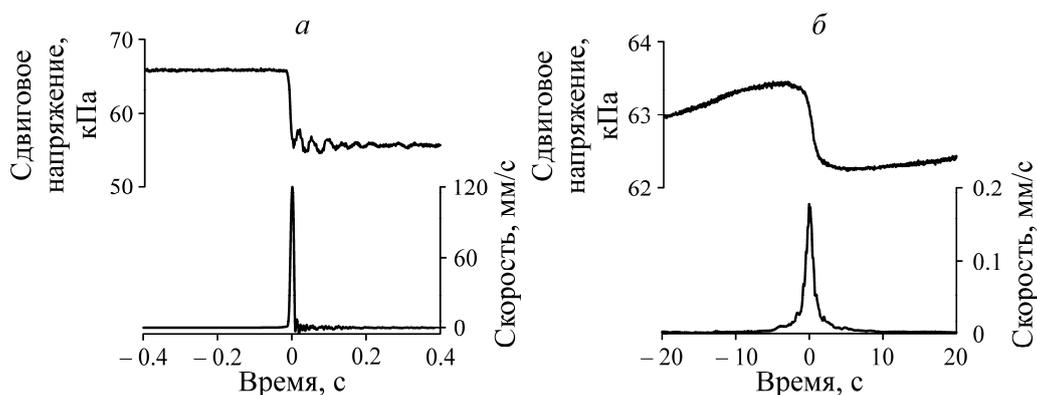


Рис. 3. Примеры быстрого (а) и медленного (б) срывов

Одним из параметров, определяющих режим деформирования, является η — вязкость флюида, увлажняющего заполнитель. Показано, что при увлажнении кварцевого песка небольшим количеством флюида ($\sim 0.5\%$ по массе) существует характерное значение η , при котором происходит резкое изменение режима скольжения [13]. Изменение вязкости в диапазоне от 0.3 мПа·с до 20 Па·с не приводит к радикальному изменению кулоновской прочности контакта τ_c , которая варьирует в пределах около 20% . Гораздо сильнее — в 15 раз — изменяется в экспериментах скачок напряжений при динамическом срыве $\Delta\tau$. Постепенно возрастая с увеличением вязкости флюида вплоть до $\eta \approx 1$ Па·с, значение $\Delta\tau/\tau_c$ резко падает почти на порядок с дальнейшим постепенным снижением. Таким образом, при значениях η выше определенного предела режим деформирования контакта вновь становится квазистабильным. Выраженные динамические события на нем практически не наблюдаются. Этот феномен связан с характером взаимодействия частиц заполнителя трещины. При добавлении небольшого количества флюида на поверхности частиц образуется тончайшая пленка, сглаживающая неровности и способствующая формированию контакта между отдельными гранулами (рис. 4). Толщина пленки флюида h при влажности 0.5% составляет порядка 0.5 мкм.

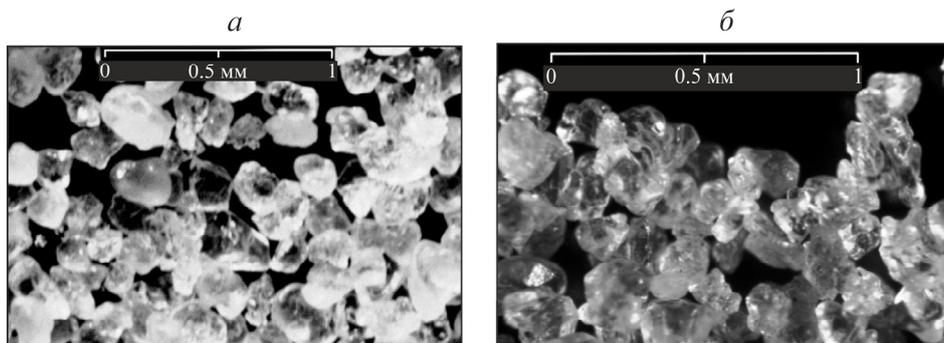


Рис. 4. Микрофотографии сухого кварцевого песка (а) и увлажненного 0.3% глицерина (б)

Чем больше η , тем лучше сглаживаются неровности частиц. Частица становится “более круглой”, что способствует образованию большего количества нагруженных контактов и увеличению амплитуды скачка напряжений при их динамическом разрушении. Это продемонстрировано в экспериментах с круглыми и угловатыми частицами [14].

Иная картина наблюдается при увлажнении песчано-глинистой смеси. Зависимость максимальной скорости скольжения от массового содержания глины в смеси, увлажненной флюидами с разной вязкостью, показана на рис. 5. В отличие от кварцевого песка, в этой серии отмечается уменьшение скорости скольжения по трещине с ростом вязкости во всем диапазоне значений. Содержание глины в смеси, при котором наблюдается переход к стабильному скольжению, существенно зависит от величины η . Так, если при увлажнении глицерином ($\eta = 950$ мПа·с) переход к крипу происходит при массовом содержании глины 2.5%, то при увлажнении водой ($\eta = 1$ мПа·с) стабильное скольжение отмечается при достаточно высоком (~25%) содержании глины в смеси. Вероятно, такое различие в поведении связано с полидисперсностью заполнителей, содержащих глину.

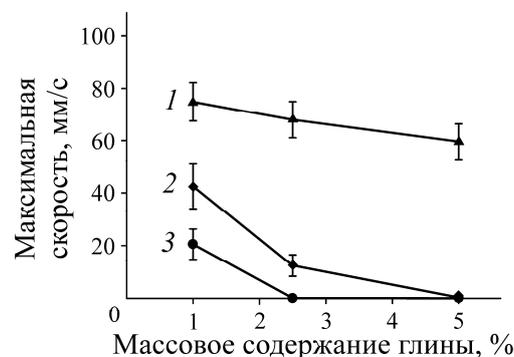


Рис. 5. Зависимость изменения максимальной скорости скольжения от массового содержания глины при увлажнении материала-заполнителя флюидом с вязкостью, мПа·с: 1 — 1; 2 — 16; 3 — 950

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТА В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНЖЕКЦИИ ФЛЮИДА

В основной серии экспериментов на определенной стадии сдвига в зону межблокового контакта, заполненного предварительно увлажненной (5% по весу) смесью песка (97.5%) и глины (2.5%), осуществлялась инъекция 5 мл флюида (~10–15% по массе от всего количества заполнителя) с отличными от увлажняющего флюида свойствами. Инъекция выполнялась через два специальных канала диаметром 1 мм, которые располагались под центром подвижного блока (см. рис. 2). Поскольку при данной постановке эксперимента значимого изменения порового давления не происходило, все наблюдаемые эффекты были связаны с изменением свойств материала-заполнителя.

После завершения опыта верхний блок удалялся и заполнитель фотографировался для приближенной оценки зоны дополнительного увлажнения (см. рис. 6б и рис. 7б). Площадь этой зоны зависела от свойств инжектируемого флюида, но не превышала 40% от общей площади контакта.

На рис. 6а представлена зависимость приложенного усилия от времени для одного из экспериментов. В этом опыте заполнитель предварительно увлажнялся жидкостью с вязкостью ~116 мПа·с (этиленгликоль), а в процессе сдвига в зону контакта впрыскивалась вода (вязкость 1 мПа·с). В ходе деформирования контакта (отрезок времени 400–600 с) установился режим

прерывистого скольжения с амплитудой сброса напряжений в цикле ~ 1.8 кПа. Максимальная скорость скольжения во время срыва составляла ~ 10 мм/с, а длительность цикла — около 20 с. В начале очередного цикла прерывистого скольжения осуществлялся впрыск жидкости с постоянной скоростью нагнетания ~ 0.5 мл/с продолжительностью примерно 10 с. Во время инъекции в течение первых 5 с наблюдалось медленное снижение уровня касательных напряжений, связанное, скорее всего, с увеличением порового давления в локальной области впрыска. По окончании процесса инъекции режим скольжения радикально изменился. При небольшом возрастании прочности контакта произошло резкое, почти на порядок, увеличение амплитуды напряжений, сбрасываемых в ходе цикла прерывистого скольжения (рис. 6а) и увеличение максимальной скорости скольжения (рис. 6в). Заметим, что на этом этапе эксперимента (для экономии времени) увеличивалась скорость протяжки.

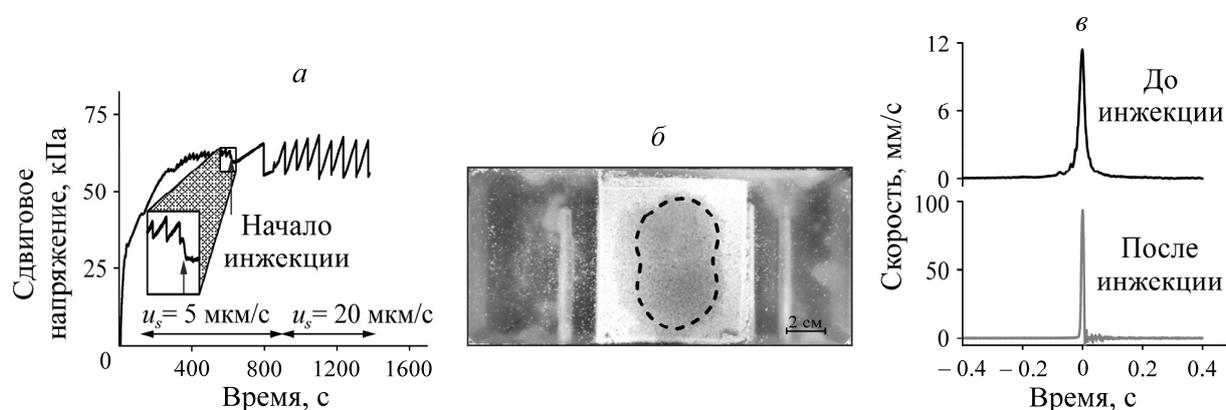


Рис. 6. Результаты эксперимента с инъекцией флюида с малой вязкостью в контактную зону, содержащую флюид большей вязкости: *а* — зависимость сдвигового напряжения от времени (обозначены интервалы с различной скоростью нагружения); *б* — вид сверху зоны межблокового контакта после процесса инъекции (пунктиром обозначена зона интенсивного увлажнения); *в* — сравнение эпюр скорости двух последовательных срывов до и после момента инъекции

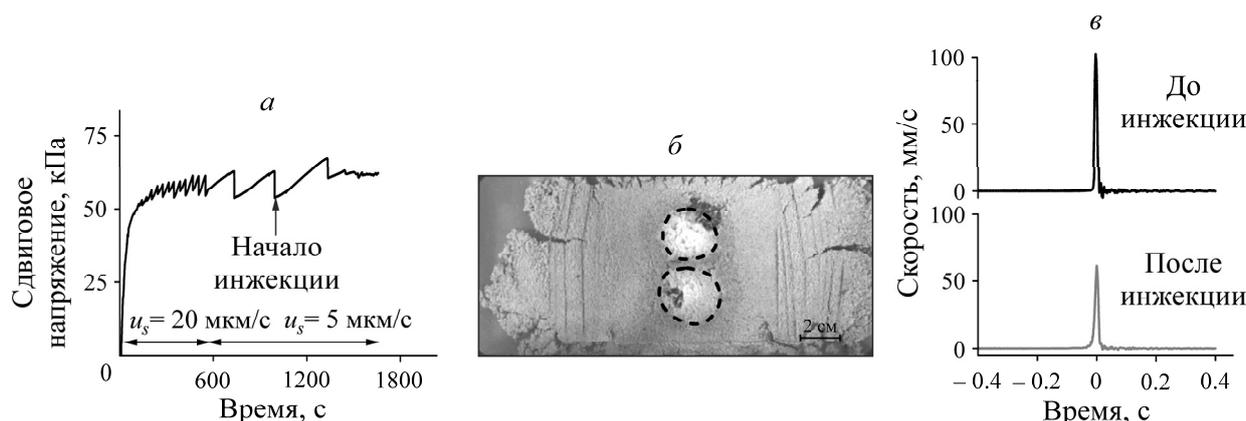


Рис. 7. Результаты эксперимента с инъекцией вязкой слабодилатантной жидкости в контактную зону, содержащую флюид меньшей вязкости: *а* — зависимость сдвигового напряжения от времени (обозначены интервалы с различной скоростью нагружения); *б* — вид сверху зоны межблокового контакта после процесса инъекции (пунктиром обозначена зона проникновения частиц крахмала; темная область вокруг — зона проникновения воды из инъецируемого раствора); *в* — сравнение эпюр скорости двух последовательных событий до и после момента инъекции

Противоположное влияние на ход деформирования оказала инъекция в зону контакта флюида с большей вязкостью. В этом случае наполнитель предварительно увлажнялся жидкостью с вязкостью 1 мПа·с (водой), а в ходе эксперимента в зону контакта впрыскивался 20 %-й водный раствор крахмала, который обладал дилатантными свойствами [15]. После установления режима прерывистого скольжения с амплитудой сброса напряжений в цикле ~ 9 кПа и максимальной скоростью скольжения около 90 мм/с, на начальной стадии очередного цикла осуществлялась инъекция раствора крахмала с постоянной скоростью нагнетания ~ 0.33 мл/с в течение 15 с. Процесс нагнетания не сопровождался изменениями параметров режима скольжения. В результате инъекции прочность контакта увеличилась примерно на 10 %. Однако амплитуда сброса напряжений и максимальной скорости скольжения при срыве, который произошел примерно через 300 с после завершения инъекции, снизилась в ~ 1.5 раза по сравнению с событием, которое случилось до инъекции. После этого скольжение практически полностью стабилизировалось, что, вероятно, связано с эффектом увеличения вязкости раствора крахмала при быстром сдвиге. Использование в аналогичном опыте вязкой ньютоновской жидкости не привело к кардинальному изменению параметров динамического срыва, следующего за моментом инъекции.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов натуральных экспериментов по инъекции воды в массив горных пород показывает, что характерный размер зоны инициированного скольжения по разлому в несколько раз превышает радиус зоны изменения порового давления. Радиус зоны изменения режима деформирования может быть еще в несколько раз больше. Этим определяются необходимые размеры зоны инъекции флюида для оказания воздействия на вероятную зону подготовки техногенно-тектонического землетрясения определенной магнитуды. Соответствующие расчеты могут быть сделаны на основе геомеханической модели массива, в котором проводятся горные работы.

Согласно результатам лабораторных экспериментов, в зависимости от свойств флюида, его инъекция в разломную зону может привести как к снижению эффективности излучения сейсмической волны при подвижке по разлому, так и к противоположному эффекту. Наиболее эффективной с точки зрения снижения сейсмического эффекта является инъекция в контактную зону дилатантной жидкости, вязкость которой увеличивается с ростом скорости деформирования. В лабораторном эксперименте динамические срывы были полностью подавлены спустя один цикл деформирования после впрыска вязкой слабодилатантной жидкости в контактную зону, причем этот эффект оказался воспроизводимым. Полученные результаты демонстрируют перспективность проведения дальнейших исследований в этом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с.
2. Wei S., Avouac J.-P., Hudnut K. W., Donnellan A., Parker J. W., Graves R. W., Helmberger D., Fielding E., Liu Z., Cappa F., Eneva M. The 2012 Brawley swarm triggered by injection-induced aseismic slip, *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, Vol. 422. — P. 115–122.
3. Мирзоев К. М., Николаев А. В., Лукк А. А., Юнга С. Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // *Физика Земли*. — 2009. — № 10. — С. 49–68.

4. Мухамедиев Ш. А. Предотвращение сильных землетрясений: реальная цель или утопия? // Физика Земли. — 2010. — № 11. — С. 49–60.
5. Кочарян Г. Г. Еще раз о возможности предотвращения землетрясений // Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания “Триггерные эффекты в геосистемах” / под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 30–39.
6. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Новиков В. А. Исследование режимов движения по разлому // Физика Земли. — 2016. — № 5. — С. 13–24.
7. Адушкин В. В., Опарин В. Н. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах: современное состояние, перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок // ГИАБ. — 2015. — № 56. — С. 24–44.
8. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В. Н. и др.; отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 625 с.
9. 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. — С. 6–13.
10. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Протасов М. И. Реконструкция объемных полей напряжений в углеродном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 12–21.
11. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. — 2016. — № 2. — С. 22–44.
12. Guglielmi Y., Cappa F., Avouac J.-P., Henry P., Elsworth D. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip, *Science*, 2015, Vol. 348. — P. 1224–1226.
13. Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. Влияние вязкости тонких пленок на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // ДАН. — 2015. — Т. 463. — № 3. — С. 343–346.
14. Кочарян Г. Г., Марков В. К., Остапчук А. А., Павлов Д. В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физ. мезомеханика. — 2013. — Т. 16. — № 5. — С. 5–15.
15. Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. — М.: Мир, 1978. — 309 с.

Поступила в редакцию 7/XII 2016