

УДК 539.3 + 550.34

Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты

Г.Г. Кочарян, В.А. Новиков¹

Институт динамики геосфер РАН, Москва, 119334, Россия

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Россия

Статья является первой частью экспериментальной работы, в которой изучались закономерности формирования различных режимов деформирования нарушений сплошности горных пород в лабораторных и полевых условиях. В лабораторных экспериментах изучены условия возникновения различных режимов скольжения для нескольких типов нарушений — контактов прочных поверхностей, трещин, заполненных кварцевым песком, тальком и глиной. Используемый набор материалов и характеристики экспериментальной установки позволили реализовать в опытах широкий спектр режимов сдвигового деформирования — от динамических срывов с максимальной скоростью в десятки мм/с, до стабильного скольжения со скоростью 1 мкм/с. Радикальное изменение поведения трещины с глиносодержащим наполнителем происходит при ее обводнении. Длительность поддвижки значительно возрастает тем в большей степени, чем выше содержание глины. Движение блока имеет длительную фазу (~100 с) плавного увеличения скорости смещения и фазу торможения примерно той же длительности. При этом скорость смещения снижается до нескольких десятков мкм/с. Как до начала перемещения блока, так на всех фазах его движения вплоть до полной остановки процесс происходит без излучения акустической эмиссии в пределах чувствительности аппаратуры. Показано, что медленные движения обладают всеми фазами, характерными для прерывистого скольжения, — разгоном, длительным скольжением, торможением, остановкой и фазой состояния покоя. Проведенные лабораторные эксперименты подтверждают ранее высказанный тезис о том, что все типы деформационных процессов в земной коре формируют единый ряд явлений.

Ключевые слова: трещины, разломы, лабораторный эксперимент, прерывистое скольжение, землетрясения, явления медленного скольжения, «тихие» землетрясения

Experimental study of different modes of block sliding along interface. Part 1. Laboratory experiments

G.G. Kocharyan and V.A. Novikov¹

Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, 125412, Russia

This paper is the first part of an experimental work on studying the formation of different deformation modes of rock discontinuities under laboratory and field conditions. The formation conditions of different sliding modes were studied under laboratory conditions for several types of discontinuities, such as rigid surface contact and cracks filled with quartz sand, talc, and clay. A wide range of shear deformation modes were experimentally reproduced—from dynamic slip with a maximum velocity of tens of mm/s to stable sliding with a velocity of 1 μm/s. The behavior of a crack with a clay-containing filler drastically changes after its wetting. The larger is the content of clay, the longer is the slip duration. The motion of a block consists of a long phase (~100 s) in which displacement velocity smoothly increases, and a retardation phase of almost the same duration in which displacement velocity decreases down to a few tens of μm/s. The used sensors detected no acoustic emission prior to the beginning of block sliding as well as on all stages of block motion until its full stop. It is shown that slow slip events have all stages typical for stick-slip motion: acceleration, long sliding, retardation, arrest, and quiescence. The conducted laboratory experiments substantiate the earlier statement that all types of deformation processes in the Earth's crust produce a common range of phenomena.

Keywords: cracks, faults, laboratory experiment, stick-slip motion, earthquakes, slow slip events, quiet earthquakes

1. Введение

В науках о Земле часто приходится рассматривать проблему скольжения блоков горной породы вдоль раз-

деляющих их границ — разломов и трещин. Круг решаемых при этом задач чрезвычайно широк (от физики очага землетрясения до устойчивости горных выра-

боток) и включает в себя рассмотрение объектов разных иерархических уровней с различными условиями на границе раздела. Некоторые из них требуют рассмотрения динамики процесса, например процесс формирования подвижки в очаге землетрясения или заключительная стадия обрушения склона, в то время как при изучении асейсмических движений по разломам, медленных движений ледников и оползней можно использовать квазистатическое приближение.

Долгое время подразумевалось, что существуют два вида скольжения вдоль нарушений сплошности массива горных пород. При первом, динамическом, режиме запасенная в среде потенциальная энергия переходит в кинетическую за очень короткое время, равное по порядку величины отношению характерного размера деформируемого блока к скорости распространения в среде релеевских волн. Классическим примером подобных событий являются «нормальные» землетрясения и горные удары. Второй тип деформации — крип или ползучесть. Применительно к нарушениям сплошности горного массива этот вид деформации часто называют асейсмическим скольжением. Типичная скорость асейсмического скольжения по разломам составляет несколько сантиметров в год. Распространенным видом деформаций является и медленный крип по поверхности литологического контакта пород на склонах. Здесь скорости могут достигать десятков сантиметров в год. Открытие и исследование в последние два десятилетия таких явлений, как низкочастотные землетрясения, тектонический тремор, эпизоды медленного скольжения в значительной степени изменяют понимание того, как реализуется энергия, накопленная в процессе деформирования массива горных пород [1–3]. При одном и том же реализованном сейсмическом моменте, в зависимости от типа деформирования, величина сейсмической энергии может отличаться на несколько порядков. Если при динамическом срыве излучаются интенсивные колебания, то при медленных деформационных режимах сейсмическое воздействие значительно слабее, а зачастую и пренебрежимо мало.

Одной из проблем, регулярно привлекающей широкое внимание, является возможность изменения сейсмического режима территории в результате тех или иных внешних воздействий. Множество примеров подобных явлений можно обнаружить при проведении горных работ, добыче углеводородов, заполнении водохранилищ и т.д. [4–6]. При этом чаще всего техногенное воздействие приводит к негативным последствиям. Актуальным примером является радикальное увеличение сейсмичности в центральных регионах США, связанное с закачкой в недра больших объемов жидкости при проведении работ по добыче сланцевого газа. Количество довольно крупных землетрясений (с магнитудой больше 3) после начала интенсивной разработки месторождений возросло здесь в 10 раз [6]. Изменение напряженного состоя-

ния массива в результате горных работ является, вероятно, причиной резкого увеличения интенсивности сейсмических событий в Кузбассе в последние несколько лет [5].

В то же время обнаружение таких эффектов привело к мысли использовать техногенное воздействие для предотвращения сильных землетрясений [7–11] либо путем замены готовящегося события рядом более мелких, либо изменением режима деформирования с динамического срыва на асейсмическое скольжение. Возможность реализации подобного сценария пока не доказана, но и не опровергнута. Научное обоснование технологии целенаправленного воздействия на горный массив невозможно без детального понимания возникновения и трансформации различных режимов скольжения.

Большинство современных моделей, применяемых для описания сдвигового деформирования нарушений сплошности, в той или иной степени базируется на эмпирическом законе трения «rate-and-state», с помощью которого удастся описать упрочнение и разупрочнение разломов и трещин [12–14]. В зависимости от параметров модели реализуется режим стабильного либо прерывистого скольжения. При определенных условиях возможно возникновение условно стабильного скольжения, связанного с бифуркацией Хопфа [15]. При этом физические причины реализации разных режимов чаще всего остаются вне рассмотрения.

В последние годы несколько групп исследователей стали изучать в лабораторных экспериментах именно механику возникновения различных деформационных режимов. Так, в ряде работ, например [16–18], исследуется предположение об изменении фрикционных свойств межблокового контакта в зависимости от скорости деформации — от скоростного ослабления при низких скоростях скольжения до скоростного упрочнения при более высоких скоростях. Хотя такое поведение наблюдается в лабораторных экспериментах для некоторых видов глиносодержащего материала, извлеченного из центральной части разломов, некоторые данные, имеющиеся для изверженных пород при соответствующих P – T условиях, не поддерживают эту гипотезу. Другой класс моделей [19, 20 и др.] основан на том обстоятельстве, что при определенных значениях параметров в модели трения «rate-and-state» возникает специфический осциллирующий режим скольжения. Такие системы являются линейно неустойчивыми по отношению к возмущениям режима стабильного скольжения. В ряде моделей, например [21 и др.], используется эффект периодических вариаций порового давления, индуцированных возмущениями поля напряжений. Анализ показывает, что ни одна из моделей не может адекватно описать наблюдаемые явления. Остается неясным, какие макроскопические параметры разломов или какие их характеристики на микро- и мезоуровне являются ответственными за реализацию того или иного дефор-

мационного режима. При этом исследования переходных деформационных режимов весьма перспективны для установления закономерностей зарождения и эволюции динамических событий.

Настоящая статья является продолжением цикла экспериментальных работ, направленных на изучение влияния различных физических параметров на закономерности скольжения по границе раздела блоков горной породы. В предыдущей нашей статье мы исследовали влияние формы и гранулометрического состава частиц заполнителя трещин на режим деформирования [22]. Ниже мы рассматриваем условия возникновения различных режимов скольжения для нескольких типов геоматериалов — кварцевого песка, талька и глины.

2. Методика

В описываемой серии экспериментов мы использовали созданную в ОИВТ РАН трибологическую установку, обеспечивающую медленное деформирование контактной зоны между двумя блоками (рис. 1). Использовались подвижный блок и неподвижная платформа, изготовленные из высокопрочного бетона марки М-500. Перемещение подвижного блока обеспечивалось электромеханическим приводом с минимальной скоростью 0.15 мкм/с. Малая скорость нагружения позволяет достигать динамическую нестабильность даже при небольших нормальных нагрузках.

Сдвиговая нагрузка обеспечивается приводом через калиброванную пружину STAMO, а нормальная — нагружением подвижного блока калиброванными грузами. Измерение усилия пружины производится датчиком УММА-К100 с точностью измерения 0.01 кг, перемещения подвижного блока — датчиком СТЕ-3000 с точностью 0.1 мм. Акустическая эмиссия регистрировалась в процессе сдвига в двух частотных диапазонах — высокочастотным датчиком ПАЭ ПГ20-200 (20–200 кГц) и низкочастотным датчиком АР57 (1 Гц – 2 кГц). Регистрация параметров производится с использованием блока АЦП USB-3000 и программного обеспечения Power-

Graph®. На установке предусмотрена система капельной подачи флюида в контактную зону через центральное отверстие, выполненное в подвижном блоке. На данной модели могут выполняться долговременные эксперименты по изучению медленного деформирования разломной зоны в течение нескольких недель. Вариация режимов нагружения и использование разных материалов-заполнителей позволяют исследовать различные режимы деформирования контактной зоны.

В описываемых сериях опытов в качестве заполнителя трещины использовался кварцевый песок (фракции с размером частиц 0–200 и 200–500 мкм), технический тальк с размером частиц менее 20 мкм и глина для строительных растворов. Во всех экспериментах начальная толщина заполнителя контактной зоны составляла 2 мм. При больших перемещениях подвижного блока за счет выдавливания заполнителя из контактной зоны его толщина уменьшалась до 0.8–1.0 мм. Нормальная нагрузка подвижного блока составляла 1.3 кН, что обеспечивало в контактной зоне блока площадью 254 см² нормальное напряжение 0.05 МПа. Жесткость пружин STAMO составляла 10.7 и 17.0 Н/мм. Скорость каретки электромеханического привода, обеспечивающего приложение сдвигового усилия, задавалась равной 1 мкм/с. В некоторых опытах проводилось обводнение контактной зоны. В течение всего такого эксперимента для исключения высыхания заполнителя в контактную зону подавалась вода через систему капельной подачи с расходом 0.05–0.10 г/с.

При обработке записей для каждого деформационного цикла определялись такие параметры, как максимальное F_{\max} и минимальное F_{\min} сдвиговое усилие, величина сброса сдвигового усилия $dF = F_{\max} - F_{\min}$, амплитуда и длительность подвижки, максимальная V_{\max} и средняя $V_{\text{ав}}$ скорость смещения блока, время нарастания скорости до максимума, момент начала и окончания интенсивной акустической эмиссии. Некоторые из этих характеристик, осредненные по событиям скольжения для каждого опыта, представлены в сводной табл. 1.

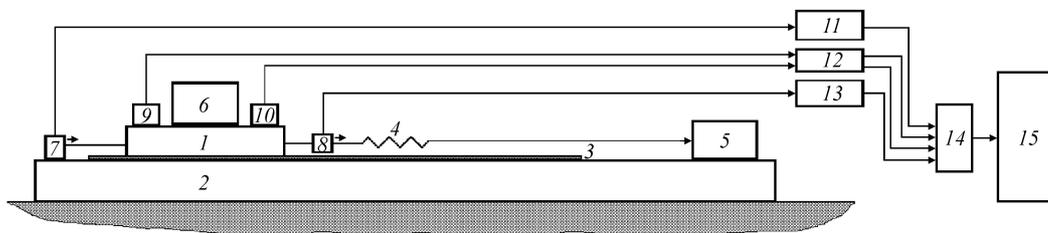


Рис. 1. Схема пружинно-блочной модели: подвижный блок (1), неподвижная платформа (2), заполнитель контактной зоны (3), пружина (4), электромеханический привод для нагружения пружины и создания сдвиговых напряжений в контактной зоне (5), нагрузка подвижного блока для создания нормальных напряжений в контактной зоне (6), датчик перемещения подвижного блока (7), датчик усилия сдвига подвижного блока (8), датчик высокочастотной акустической эмиссии (9), датчик низкочастотной акустической эмиссии (10), усилители аналоговых сигналов датчиков (11–13), АЦП (14), компьютер (15)

Таблица 1

Средние значения параметров деформационных процессов для различных контактов

Тип контакта	Количество циклов	F_{max} , Н	F_{min} , Н	dF , Н	Амплитуда подвижки, мм	Длительность подвижки, с	Максимальная скорость, мм/с	Средняя скорость, мм/с
Сухие бетонные поверхности	11	806±27	742±19	64±20	5.7±1.8	0.7±0.1	15.2±6.0	6.7±3.8
Влажные бетонные поверхности	6	690±55	522±47	168±50	9.8±2.9	0.5±0.1	33.3±12.8	18.8±5.1
Сухой песок	12	796±5	768±4	28±1	1.7±0.1	0.5±0.1	5.4±0.6	3.3±0.9
Песок 95 % + тальк 5 %	26	779±6	750±6	29±6	0.74±0.10	0.74±0.10	2.3±0.5	1.0±0.3
Песок 90 % + тальк 10 %	30	746±1	736±1	10±1.7	0.6±0.1	10.7±4.4	0.7±0.3	0.07±0.04
Песок 75 % + тальк 25 %	33	662±4	652±4	10±3	0.8±0.2	19.9±4.9	1.0±0.4	0.08±0.01
Сухая глина	23	913±8	899±8	14±4	0.8±0.2	4.7±1.4	0.8±0.4	0.2±0.1
Обводненная глина	16	726±7	712±15	13±9	1.0±0.3	286±209	0.014±0.007	0.004±0.003

3. Результаты экспериментов

Используемый набор материалов и характеристики экспериментальной установки позволили реализовать в опытах различные режимы скольжения.

На рис. 2 приведены типичные зависимости величины сдвигового усилия от перемещения (реологические кривые) для опытов с разными геоматериалами. Зависимость для контакта плоских сухих бетонных поверхностей демонстрирует выраженное прерывистое сколь-

жение, или стик-слип (линия 2). На рис. 3 в деталях показан пример динамического срыва. Блок, первоначально находящийся в покое, срывается после достижения критического уровня сдвигового усилия $F_{s,max}$ и движется в течение ~ 0.3 с со средней скоростью ~ 7 мм/с. Снижение сдвигового усилия составляет при этом величину $\sim 4\%$ от $F_{s,max}$. Если максимум отношения F_s/F_n определяется сдвиговой прочностью контакта, то минимум несколько меньше коэффициента трения

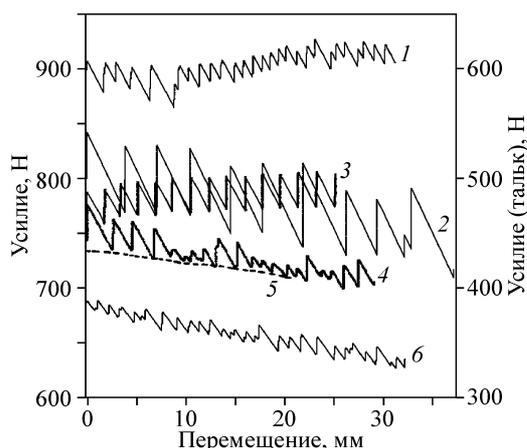


Рис. 2. Реологические зависимости «сдвиговое усилие – перемещение по границе раздела», полученные в нескольких опытах с различными заполнителями: сухая глина (1), сухие бетонные поверхности (2), песок (3), обводненная глина (4), тальк (5), смесь песка (75 % по массе) и талька (6). Зависимости 1–4, 6 относятся к левой оси ординат, зависимость 5 — к правой оси ординат

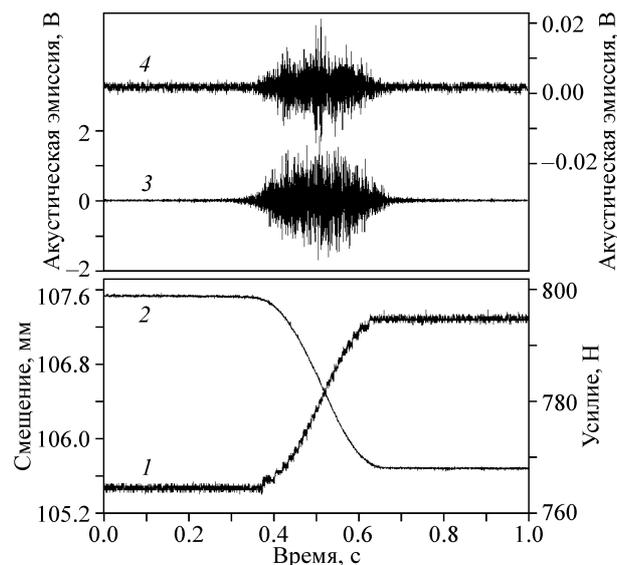


Рис. 3. Динамический срыв контакта бетонных поверхностей: смещение (1), усилие (2), высокочастотная (3, левая ось координат) и низкочастотная акустическая эмиссия (4)

скольжения. Полное время цикла определяется скоростью приложения нагрузки и в описываемой серии составило $t \sim 6000$ с. Процесс подвижки четко фиксируется и на записи акустической эмиссии. В случае контакта плоских бетонных поверхностей ни на записях перемещения, ни на записях акустической эмиссии не удается обнаружить каких-либо предвестников будущего динамического события. Не наблюдается и постдинамической деформации.

Обводнение контактной зоны ведет к заметному снижению величины критического усилия. В среднем величина предельного угла трения бетона уменьшается примерно на 4° . Несколько снижается и уровень акустической эмиссии. Хотя характер скольжения остается прежним, такие параметры динамического деформирования, как скорость скольжения и амплитуда сдвига, возрастают в 2.0–2.5 раза.

Заполнение трещины различными материалами приводит к существенному изменению характера деформирования. Средние значения зарегистрированных и рассчитанных параметров процесса для различных контактов приведены в табл. 1, а зависимости смещения от времени в отдельных актах скольжения — на рис. 4.

В наших более ранних опытах трещина, заполненная сухим (прокаленным в муфельной печи) кварцевым песком, демонстрировала при жесткости нагружающего элемента 60 Н/мм стабильное скольжение после достижения касательными напряжениями кулоновского предела прочности [22]. Использование песка комнатной влажности приводит при жесткости пружины 17 Н/мм к переходу от стабильного скольжения к прерывистому. Несмотря на то что статические прочности контакта бетонных поверхностей и контакта, заполненного песком, близки, амплитуда сброса сдвигового усилия и, соответственно, амплитуда подвижки и скорость скольжения в последнем случае значительно ниже (см. рис. 2, 4, табл. 1). Насыщение песчаного заполнителя водой не приводит к существенным вариациям режима скольжения.

Одним из геоматериалов, который может серьезно изменить прочностные характеристики разлома, является тальк. Фрикционная прочность талька значительно ниже фрикционной прочности силикатных пород типа гранита и минералов группы серпентина (антгорита, лизардита и др.), причем с ростом температуры и давления эти различия возрастают. Предполагается, что тальк образуется в результате химической реакции серпентина с двуокисью кремния, содержащейся в термальных флюидах. Тальк замещает минералы группы серпентина вдоль стенок трещин, складок, элементов сланцеватости. Недавнее обнаружение присутствия минерального талька в кернах, отобранных в скважинах на глубине ~ 3 км вдоль разлома Сан-Андреас, было использовано для одного из объяснений низкой прочности данной структуры [23].

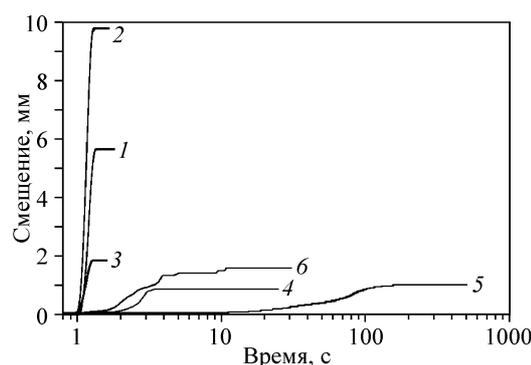


Рис. 4. Зависимость смещения от времени в отдельных актах скольжения для различных контактов: сухой бетон (1), увлажненный бетон (2), сухой песок (3), сухая глина (4), обводненная глина (5), смесь песка с тальком (6)

Даже добавление 1–5 % талька к кварцевому песку заметно снижает коэффициент трения покоя. Для смеси из 75 % песка и 25 % талька характерно значение $k \sim 0.5$, по сравнению с $k \sim 0.61$ для песка. Фрикционная прочность контакта, заполненного чистым тальком, соответствует значению $k \sim 0.39$. Для смесей, содержащих тальк, характер прерывистого скольжения заметно изменяется. По мере увеличения содержания этого минерала снижается амплитуда сброшенного напряжения. Так, для смеси, содержащей 5 % талька, средняя величина dF составляла около 20 Н (28 Н для чистого песка), а при 10 % талька сброс усилия составляет уже всего порядка 10 Н. Еще более радикально изменения проявляются в длительности подвижки и, соответственно, в значениях скорости скольжения. Десятипроцентная добавка талька увеличивает длительность скольжения более чем на порядок. При этом максимальная скорость скольжения снижается, по крайней мере, в несколько раз. Характер акустической эмиссии на стадии скольжения аналогичен соответствующим импульсам для песка или бетона, хотя амплитуда регистрируемых импульсов существенно ниже. При дальнейшем увеличении содержания талька длительность скольжения продолжает возрастать. Трещина, заполненная чистым тальком, проявляет при используемых параметрах нагружения свойства стабильного скольжения (рис. 2, кривая 5).

В некоторых опытах с тальком наблюдался нетипичный эффект — короткое (около 2 с) проскальзывание, после которого происходит длительное, в несколько десятков (!) секунд, выраженное постдинамическое скольжение с затухающей скоростью (рис. 5).

Геоматериалы, слагающие центральную часть разломной зоны, как правило, содержат большое количество глинистых минералов. В крупных разломах последние составляют от 37 до 85 % перетертого материала магистрального сместителя [18, 24]. Столь высокое содержание глины характерно для верхней части разломов, расположенной в пределах аккреционной призмы

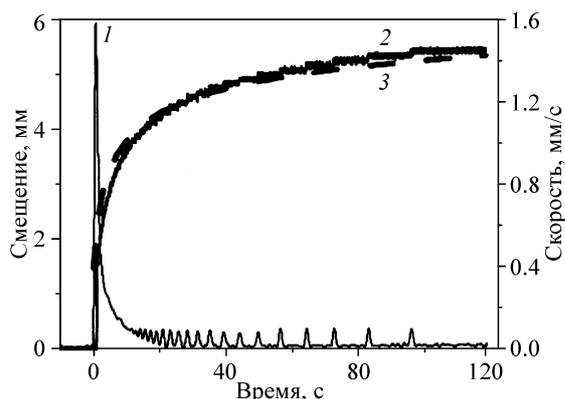


Рис. 5. Фрагмент записи скорости смещения (1) и смещения (2) блока вдоль трещины, заполненной тальком. Пунктиром 3 показана функция (14) с $\alpha = 0.175$. Мелкие пики на эпюре скорости являются следствием инерционности датчика перемещения

и вблизи нее. С увеличением глубины содержание глины падает, а содержание кварца растет, тем не менее и на достаточно больших глубинах материал в магистральной части разлома неизменно содержит такие минералы, как смектит, каолинит и др. Коллоидные пленки, формируемые глинистыми минералами, обладают выраженными вязкими свойствами и даже в небольшом количестве могут оказать радикальное влияние на фрикционные характеристики разлома.

Были выполнены серии опытов с целью исследования деформационного режима трещины при заполнении ее глиной, а также смесью глины с кварцевым песком. Для заполнения контактной зоны использовалась дисперсная глина с размером частиц <0.5 мм. Режим деформирования и прочностные характеристики трещины, заполненной сухой смесью, меняются довольно слабо при изменении объемного содержания глины в смеси до 50 %. Можно отметить некоторый рост предельной прочности и небольшое снижение скорости скольжения при высоком проценте содержания глины в смеси. Динамическая подвижка предваряется значительным ростом акустической эмиссии (особенно в высокочастотной области).

По сравнению с контактом из кварцевого песка, для трещины, полностью заполненной глиной, время скольжения возрастает в несколько раз при соответствующем снижении максимальной и средней скорости скольжения (рис. 4, б, а, б, табл. 1). Необходимо подчеркнуть, что характер скольжения зависит и от жесткости нагружения. На рис. 6, в, где жесткость пружины в 1.7 раз ниже, динамический срыв с большой скоростью наблюдается и на сухой глине. Время скольжения при этом снижается на порядок.

Радикальное изменение поведения трещины с глино-содержащим наполнителем происходит при ее обводнении. При этом, что статическая прочность трещины

близка к соответствующему значению для песка, длительность подвижки значительно возрастает тем в большей степени, чем выше содержание глины. Характерно, что движение имеет длительную фазу (~ 100 с) плавного увеличения скорости смещения, а затем фазу торможения (рис. 6, в, д) примерно той же продолжительности. Соответственно, скорость смещения снижается до величины в несколько десятков мкм/с. И до начала перемещения блока, и на всех фазах его движения вплоть до полной остановки процесс происходит без излучения акустической эмиссии в пределах чувствительности аппаратуры. Обратим внимание, что, несмотря на то что при «мягком» и «жестком» нагружении сухой глины длительность скольжения отличается на порядок, для влажной глины различие не столь велико.

4. Обсуждение

В опытах удалось реализовать широкий спектр режимов сдвигового деформирования поверхности раздела — от динамических срывов с максимальной скоростью в десятки мм/с до стабильного скольжения со скоростью 1 мкм/с.

В большинстве проведенных экспериментов исследуемый контакт демонстрировал поведение, соответствующее прерывистому скольжению, — серии периодических срывов вдоль поверхности скольжения, между которыми относительного смещения блоков не происходит или почти не происходит. Необходимо заметить, что в ряде случаев мы наблюдали необычный стик-слип — медленный набор скорости и плавное торможение, так что цикл длился десятки и сотни секунд. Однако формально все фазы прерывистого скольжения — разгон, скольжение, торможение, остановка, состояние покоя — присутствовали. По всей видимости, подобный деформационный режим соответствует в природе таким явлениям, как тихие землетрясения и события медленного скольжения.

В связи с этим оказывается удобным использовать для задания силы сопротивления сдвигу модель «rate-and-state», базирующуюся на экспериментальных исследованиях Дж. Дитериха [12], подытоженных Э. Руиной [25]. В соответствии с законом Дитериха, коэффициент трения представляется в виде

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{|\dot{x}|}{u^*}\right) + b \ln\left(\frac{u^* \theta}{D_c}\right), \quad (1)$$

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

$$\dot{\theta} = 1 - \left(\frac{|\dot{x}| \theta}{D_c}\right). \quad (2)$$

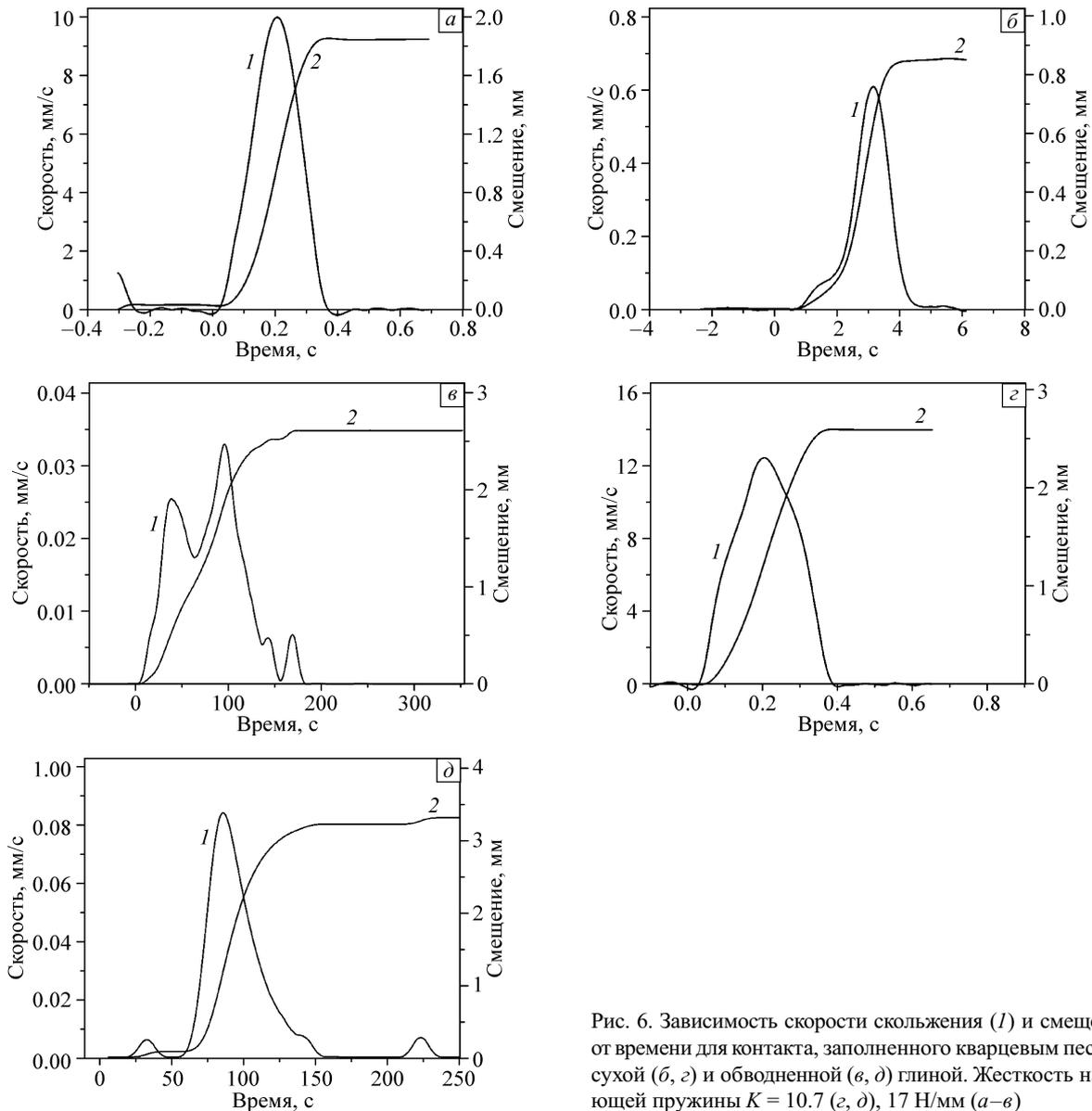


Рис. 6. Зависимость скорости скольжения (1) и смещения (2) от времени для контакта, заполненного кварцевым песком (а), сухой (б, в) и обводненной (в, д) глиной. Жесткость нагружающей пружины $K = 10.7$ (в, д), 17 Н/мм (а–в)

В состоянии стабильного скольжения с некоторой скоростью $\dot{x} = u_0$ переменная состояния θ принимает значение $\theta = D_c / u_0$. Это значение может быть использовано в качестве начального условия при решении уравнения (1).

Иногда параметру D_c приписывают физический смысл, полагая, что это есть характерный размер, на котором «изменяется популяция контактов», или, иными словами, контакт переходит в фазу развитого скольжения.

В соответствии с законом Дитериха, коэффициент трения зависит от скорости скольжения и при стабильном скольжении со скоростью u_0 равен

$$\mu = \mu_0 + (a - b) \ln \left(\frac{u_0}{u^*} \right). \quad (3)$$

«Критическим» для характера изменения фрикционного сопротивления является значение разности параметров $\Delta = b - a$. При $a > b$ коэффициент трения при перемещениях больше критического остается больше исходного значения, т.е. наблюдается скоростное упрочнение, а при $a < b$ коэффициент трения при перемещениях больше критического становится меньше исходного значения, т.е. наблюдается скоростное разупрочнение. Понятно, что при $a > b$, т.е. при скоростном упрочнении, система будет оставаться стабильной. Условие $a < b$, т.е. скоростное разупрочнение, обеспечивает условия для возникновения прерывистого скольжения.

Помимо наличия эффекта динамического «разупрочнения» контакта необходимым условием устойчи-

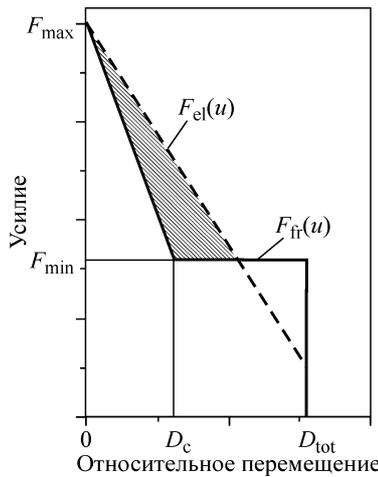


Рис. 7. Схематическая зависимость сдвигового усилия от межблокового перемещения в процессе скольжения. Сплошной линией показана величина сопротивления сдвигу, пунктиром — приложенное сдвиговое усилие

вого прерывистого скольжения является достаточно большая сдвиговая жесткость контакта в фазе разгрузки, превышающая жесткость k нагружающей системы, в нашем случае жесткость пружины

$$k_s \approx \sigma_n \left| \frac{d\mu}{dx} \right| > k. \tag{4}$$

Рассмотрим процесс динамического срыва, используя диаграмму «усилие – перемещение» (рис. 7). При достижении нагружающим усилием предела прочности контакта F_{max} и выполнении условия (4) сила сопротивления сдвигу $F_{fr}(u)$ начинает снижаться с ростом перемещения быстрее, чем приложенная нагрузка $F_{el}(u)$. В результате начинается скольжение, описываемое уравнением

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F_k(u) - F_s(u), \tag{5}$$

где m — масса подвижного блока; u — относительное перемещение блоков; F_k — нагружающее усилие; F_s — сила сопротивления сдвигу.

После выполнения условия

$$\int_{x_0}^x [F_k(\chi) - F_s(\chi)] d\chi = 0 \tag{6}$$

скольжение блока по границе раздела прекращается и начинается новый цикл накопления потенциальной энергии пружины. Здесь $F_k(\chi)$ — приложенное сдвиговое усилие; $F_s(\chi)$ — сила сопротивления сдвигу; x_0 — координата, соответствующая началу скольжения.

На рис. 8 приведены примеры экспериментальных зависимостей $F(x)$ для отдельных эпизодов скольжения в некоторых экспериментах.

Как видно из экспериментальных зависимостей, в тех случаях, когда сила сопротивления сдвигу снижается

с перемещением значительно быстрее, чем нагружающее усилие, заметная часть накопленной энергии переходит в излучение. Для влажной глины вариация величины сопротивления сдвигу подобна общей картине для других материалов (штрих-пунктир на рис. 8, д), хотя величина ее чрезвычайно мала. Именно поэтому кривая сопротивления сдвигу практически совпадает с нагружающим усилием.

Таким образом, режимы скольжения, реализованные в опытах с контактом без заполнителя, с песком, с сухой глиной (в случае 10.7 Н/мм) можно отнести к типичным динамическим событиям с резким вступлением и практически без последующего слипа.

Проведенные эксперименты позволяют заключить, что режим скольжения определяется соотношением двух жесткостей — жесткости трещины в фазе разгрузки и жесткости нагружения. Частным следствием этого утверждения является хорошо известное условие возникновения прерывистого скольжения (4).

Здесь уместно обсудить вопрос о жесткости массива и жесткости трещины или разлома.

Для оценки жесткости массива (в нашем случае жесткости пружины) в сейсмологии часто используют простейшее решение о сдвиге среды, содержащей тонкую трещину конечной длины L :

$$\tau = G\epsilon = \eta G \frac{\delta}{L}, \tag{7}$$

где τ — сдвиговое напряжение; G — модуль сдвига; δ — относительное смещение; $\eta \sim 1$ — коэффициент формы.

Соответственно,

$$k = \frac{\partial \tau}{\partial \delta} = \frac{\eta G}{L}. \tag{8}$$

Примерно такое же выражение дает теория упругой отдачи Рейда:

$$k = \frac{G}{L} \tag{9}$$

при условии, что размер блока в направлении нормальном границе раздела равен его длине.

С нашей точки зрения, более корректно оценивать величину k в виде

$$k = \frac{G}{\lambda}, \tag{10}$$

где λ — расстояние между соседними разломами одного ранга. Согласно [26], для крупных разломов $\lambda \approx (0.25 - 0.33)L$, а L — длина разлома. Для мелких трещин параметр λ может изменяться в более широких пределах.

Еще большая неопределенность имеет место при оценке жесткости разлома. Авторы [27] в расчетах использовали линейное приближение для оценки жесткости разлома, определяя ее как отношение осредненных по толщине напряжений к среднему перемещению по разлому $k_f = \bar{\tau}/\bar{\delta}$. Х. Канамори [28] и К. Шольц [15] определяют жесткость разлома в виде отношения

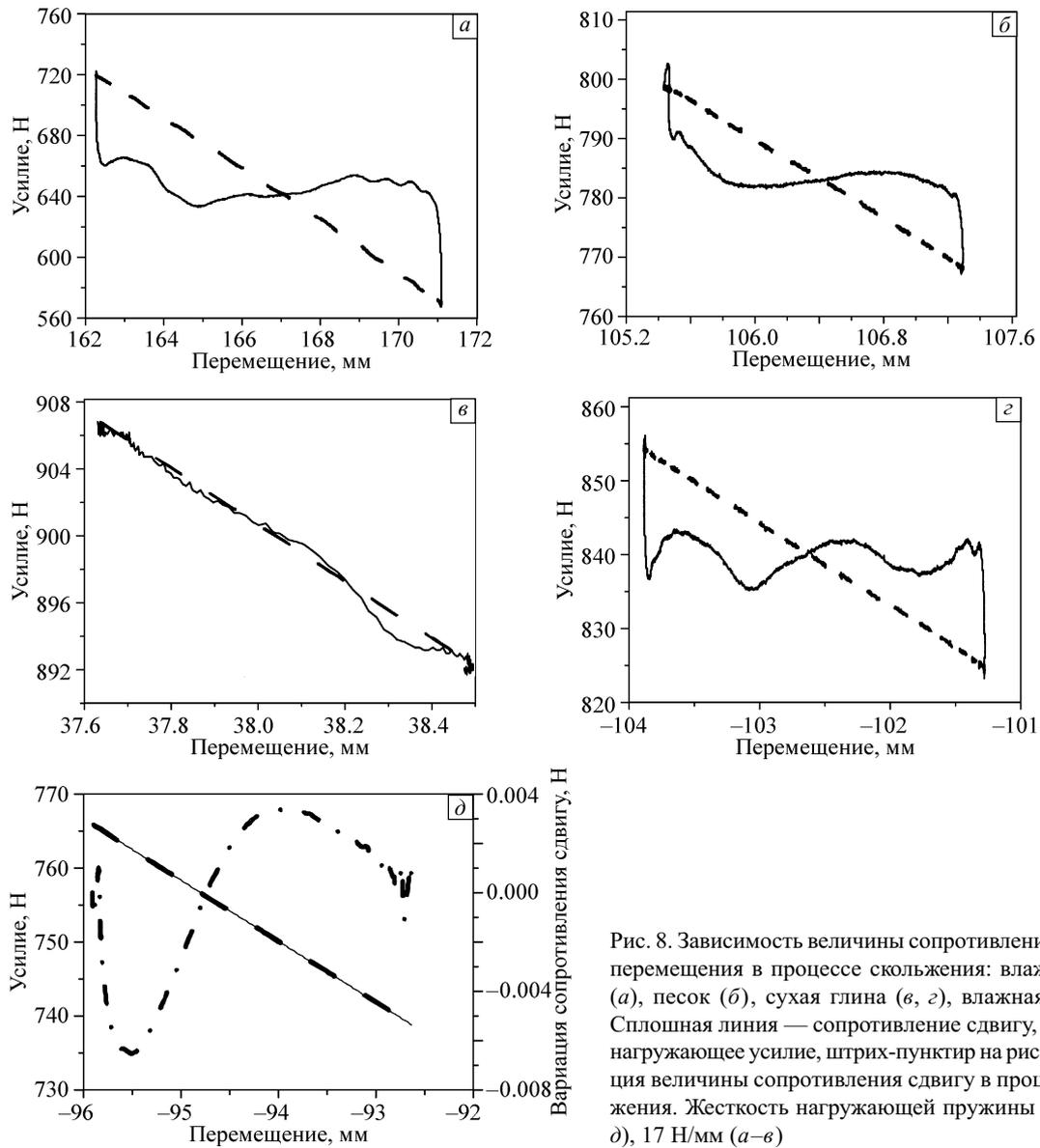


Рис. 8. Зависимость величины сопротивления сдвигу от перемещения в процессе скольжения: влажный бетон (а), песок (б), сухая глина (в, г), влажная глина (д). Сплошная линия — сопротивление сдвигу, пунктир — нагружающее усилие, штрих-пунктир на рис. д — вариация величины сопротивления сдвигу в процессе скольжения. Жесткость нагружающей пружины $K = 10.7$ (г, д), 17 Н/мм (а–в)

$$k_f = \chi \frac{G}{L_c}, \tag{11}$$

где $\chi \approx 1$ — коэффициент формы; L_c — некий характерный размер зоны нуклеации, которая часто ассоциируется с некоторым контактным пятном или «зацепом». Оценки характерного размера L_c для разломных зон изменяются в очень широких пределах от сантиметров [28] до километра [15]. Использование современных моделей трения дает величину $L_c \sim 1 \text{ м}$ [29]. Определение (11) следует из идеализированного представления разлома в виде бесконечно тонкого контакта и является, с нашей точки зрения, не очень удачным. Так, например, оценка по (11) дает

$$k_f \approx \frac{G}{L_c} \sim \frac{5 \cdot 10^{10} \text{ Па}}{1 \text{ м}} \sim 5 \cdot 10^{10} \text{ Па/м},$$

что находится в явном противоречии с экспериментальными данными [30]. Кроме того, пока совершенно неясны закономерности изменения параметра L_c , а соответственно, и жесткости (11) с масштабом.

С нашей точки зрения, более правильно использовать эмпирические зависимости интегральной сдвиговой жесткости разлома от его длины. Интегральные жесткости разломной зоны

$$k_n = \frac{d\sigma_n}{dW_n}, k_s = \frac{d\tau}{dW_s} \tag{12}$$

во многих случаях определены экспериментально с помощью сейсмических методов, так что опорные зависимости $k_n(L)$ и $k_s(L)$ построены в широком диапазоне длин нарушений сплошности — от метров до сотен километров [30, 31]. В выражении (12) σ_n и τ — нормаль-

ные и сдвиговые эффективные напряжения, действующие в окрестности разрыва; W_n и W_s — относительное нормальное и сдвиговое перемещение его берегов.

Судя по результатам проведенных экспериментов, определяющий вклад в реологию трещин вносит кулоновское трение, а не пластическое течение. Даже в случае медленного постсейсмического слипа в эксперименте с тальком (рис. 5), параметры движения ближе к сухому трению.

В работах [32, 33] установлено, что любое постдинамическое движение по границе блоков с удовлетворительной точностью может быть описано уравнением с использованием реологических соотношений типа структурной сверхпластичности:

$$\dot{W} = \frac{1}{\zeta} \sigma_s^{1/\alpha}. \quad (13)$$

В [32, 33] показано, что в этом случае межблоковое перемещение определяется выражением

$$W(t) = \frac{\varphi V_0}{\alpha} \left\{ 1 - \left[1 + (1 - \alpha) \frac{t}{\varphi} \right]^{\alpha/(\alpha-1)} \right\}, \quad (14)$$

где $V_0 = dW/dt(0)$ — скорость смещения; σ_{s0} — величина касательных напряжений на границе блоков в момент окончания динамической фазы движения; k_s — сдвиговая жесткость контакта; $\varphi = \alpha/(k_s V_0) \sigma_0$ — характерное время процесса.

При $\alpha \rightarrow 1$ уравнение структурной сверхпластичности (13) переходит в соотношение для ньютоновской вязкой жидкости

$$\sigma_s = \eta \dot{W}, \quad (15)$$

а выражение (14) стремится к известному соотношению

$$\lim_{\alpha \rightarrow 1} W(t) = V_0 \varphi (1 - e^{-t/\varphi}), \quad (16)$$

где характерное время $\varphi = \eta/(k_s l) = \eta/G$; η , G и l — соответственно эффективные значения вязкости, модуля сдвига и толщины межблокового контакта.

Другим предельным случаем является $\alpha \rightarrow 0$. В этом случае

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} W(t) = V_0 \varphi \ln \left(1 + \frac{t}{\varphi} \right), \quad (17)$$

что совпадает с соответствующим выражением для модели сухого трения со скоростным упрочнением [12].

В выражении (17) $\varphi = \xi \sigma_{s0}/(k_s V_0)$, ξ — коэффициент из соответствующей зависимости сопротивления сдвигу от скорости перемещения:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left[1 + \xi \ln \left(\frac{V}{V_0} \right) \right]. \quad (18)$$

Если при малых временах ($\varphi/t < 1$) все возможные типы реологических зависимостей (14), (16), (17) практически идентичны, то с увеличением времени наблюдения их асимптотика радикально различается. Таким образом, имея достаточно длинный ряд измерений параметров межблоковых перемещений, можно судить о механизме взаимодействия блоков.

Наилучшее приближение кривой постдинамического слипа в экспериментах с тальком (рис. 5) достигается при использовании соотношения (14) с $\alpha = 0.175$, что довольно близко к закону сухого трения.

Вариации параметров «rate-and-state» в численных расчетах, выполненных по модели, изложенной в [34], показывают, что снижение скорости относительного скольжения блоков происходит при увеличении параметра D_c или снижении величины параметра $\Delta = a - b$. Однако в рамках этой модели не удастся описать радикальное увеличение времени скольжения, так как это происходит в эксперименте с водонасыщенной глиной.

Подробный анализ влияния параметров уравнения (1) на характеристики движения выходит за рамки настоящей статьи.

5. Заключение

Выполненная серия экспериментов позволила реализовать широкий спектр режимов скольжения и установить, по крайней мере, одну из причин возникновения медленных движений по разломам и трещинам. Традиционно предполагалось, что скорость снижения сопротивления сдвигу в процессе скольжения (жесткость разгрузки разлома) существенно выше скорости снижения приложенных напряжений (жесткость разгрузки массива). В самом деле, для разлома длиной 1 км имеем, согласно (10), жесткость разгрузки массива: $k \sim \sim G/(\lambda L) \approx (1 \div 5) \cdot 10^7$ Па/м, а интегральная жесткость разлома примерно на порядок выше $k_s \sim (1 \div 3) \times \times 10^8$ Па/м [31]. При этом с ростом масштаба жесткость массива снижается быстрее, чем жесткость разлома [31]. Таким образом, в большинстве случаев достижение уровнем напряжений предела фрикционной прочности оказывается достаточным для возникновения динамического срыва (здесь мы оставим вне обсуждения влияние уровня нормальных напряжений на минимальный размер области нуклеации — зарождения динамического срыва).

Однако наличие обводненных глин резко снижает сдвиговую жесткость разлома или трещины, так что величина k_s может составлять заведомо менее 10 % от нормальной жесткости [30]. В то же время высокая степень локализации деформаций в массиве (низкая степень трещиноватости, большое расстояние между разломами одного простирания) может привести к увеличению в несколько раз жесткости разгрузки массива, так что величины k и k_s могут оказаться довольно близки, что, как было показано выше, может привести к возникновению медленных движений по разломам, либо асейсмичных, либо с низкой интенсивностью излучения.

В заключение еще раз подчеркнем, что медленные движения обладают всеми фазами, характерными для прерывистого скольжения, — разгоном, длительным

скольжением, торможением, остановкой и состоянием покоя. Проведенные лабораторные эксперименты подтверждают тезис, предложенный в работе [1], о том, что все типы деформационных процессов в земной коре формируют единый ряд явлений.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-17-00719).

Литература

1. Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nature Geoscience*. – 2010. – V. 3. – P. 599–607.
2. Ide S., Beroza G.C., Shelly D.R., Uchide T. A scaling law for slow earthquakes // *Nature*. – 2007. – V. 447. – No. 7140. – P. 76–79.
3. 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. – V. 5(4). – P. 863–891.
4. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). – М.: ИНЭК, 2005. – 252 с.
5. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Крупнейший техногенный сейсмический процесс на земле. Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ($M_L = 6.1$, Кузбасс) // Сб. матер. Межд. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология», Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. – Т. 2. – С. 80–84.
6. Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes // *Science*. – 2013. – V. 341. – No. 6142. – P. 1225942.
7. Пат. 2289151 РФ. Способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений / К.М. Мирзоев, А.В. Николаев, А.А. Лукк, С.Л. Юнга // Бюлл. изобр. – 2006. – № 34.
8. Пат. 2273035 РФ. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / С.Г. Псахье, В.Л. Попов, Е.В. Шилько, С.В. Астафуров, В.В. Ружич, О.П. Сmealin, С.А. Борняков // Бюлл. изобр. – 2006. – № 9(II).
9. Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V., Popov V.L., Astafurov S.V. A new way to manage displacements in zones of active faults // *Tribol. Int.* – 2007. – V. 40. – P. 995–1003.
10. Филиппов А.Э., Попов В.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. О возможности перевода динамики смещений в блочных средах в режим ползучести // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – № 12. – С. 77–86.
11. Астафуров С.В., Шилько Е.В., Псахье С.Г. Исследование влияния параметров напряженного состояния фрагментов разломных зон на особенности их механического отклика при сдвиговом деформировании // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 2. – С. 76–101.
12. Dieterich J. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res. B.* – 1979. – V. 84. – No. 5. – P. 2161–2168.
13. Попов В.Л., Grzempa B., Starcevic J., Fabry C. Ускоренная ползучесть как предвестник фрикционной неустойчивости и проблема предсказания землетрясений // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 85–95.
14. Popov V.L., Grzempa B., Starcevic J., Popov M. Rate and state dependent friction law and prediction of earthquakes: What can we learn from laboratory models? // *Tectonophysics*. – 2012. – V. 532. – P. 291–300.
15. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. – 1998. – V. 391. – P. 39–42.
16. Shibasaki B., Iio Y. On the physical mechanism of silent slip events along the deeper part of the seismogenic zone // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30. – No. 9. – P. 1489. – DOI 10.1029/2003GL017047.
17. Shibasaki B., Shimamoto T. Modelling of short-interval silent slip events in deeper subduction interfaces considering the frictional properties at the unstable–stable transition regime // *Geophys. J. Int.* – 2007. – V. 171. – No. 1. – P. 191–205.
18. Ikari M., Niemeijer A.R., Spiers C.J., Kopf A.J., Saffer D.M. Experimental evidence linking slip instability with seafloor lithology and topography at the Costa Rica convergent margin // *Geology*. – 2013. – V. 41. – No. 8. – P. 891–894.
19. Liu Y., Rice J. Aseismic slip transients emerge spontaneously in three-dimensional rate and state modeling of subduction earthquake sequences // *J. Geophys. Res. B.* – 2005. – V. 110. – P. 08307.
20. Liu Y., Rice J.R. Spontaneous and triggered aseismic deformation transients in a subduction fault model // *J. Geophys. Res. B.* – 2007. – V. 112. – P. 09404.
21. Perfettini H., Ampuero J.-P. Dynamics of a velocity strengthening fault region: Implications for slow earthquakes and postseismic slip // *J. Geophys. Res. B.* – 2008. – V. 113. – P. 09411.
22. Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 5–15.
23. Moore D.E., Rymer M.J. Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault // *Nature*. – 2007. – V. 448. – P. 795–797.
24. Ujiie K., Tanaka H., Saito T. et al. Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments // *Science*. – 2013. – V. 342. – No. 6163. – P. 1211–1214.
25. Ruina A. Slip instability and state variable friction law // *J. Geophys. Res. B.* – 1983. – V. 88. – No. 12. – P. 10359–10370.
26. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). – Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1983. – 110 с.
27. Kostrov B.V., Das S. On the Elastic Contact Modeling of Faults With Variable Stiffness // *Geophysical Monograph #37: Earthquake Source Mechanics*. – NY: American Geophysical Union, 1986. – P. 65–71.
28. Kanamori H., Brodsky E.E. The physics of earthquakes // *Rep. Prog. Phys.* – 2004. – V. 67. – P. 1429–1496.
29. Lapusta N., Rice J.R. Nucleation and early seismic propagation of small and large events in a crustal earthquake model // *J. Geophys. Res. B.* – 2003. – V. 108. – No. 4. – P. 2205.
30. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 23–42.
31. Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сеймотектонике // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 353–385.
32. Kocharyan G.G., Kulyukin A.A., Pavlov D.V. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust // *Russ. Geology Geophys.* – 2006. – V. 47. – No. 5. – P. 669–683.
33. Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – № 1. – С. 5–14.
34. Будков А.М., Кочарян Г.Г. Численное моделирование процесса сдвига трещины со сложной реологией // *Динамические процессы в геосферах: Сб. научных трудов ИДГ РАН. Вып. 6.* – М.: ГЕОС, 2014. – С. 5–14.

Поступила в редакцию
26.03.2015 г.

Сведения об авторах

Кочарян Геворг Грантович, д.ф.-м.н., зав. лаб. ИДГ РАН, gevorgkidg@mail.ru
Новиков Виктор Александрович, к.т.н., зав. лаб. ОИВТ РАН, novikov@ihed.ras.ru