

УДК 550.34 + 53.02

Изменение кинематических параметров скольжения модельного разлома при медленных и быстрых деформационных событиях

А.А. Остапчук^{1,2}, Н.В. Салтыков¹, В.С. Мартынов²¹Институт динамики геосфер РАН, Москва, 119334, Россия²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия

В статье представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых исследовались различные режимы деформирования модельного разлома. В ходе экспериментов были смоделированы как эпизоды скольжения с большой скоростью, соответствующие в натуре обычным землетрясениям, так и медленное скольжение — аналог низкочастотных землетрясений и событий медленного скольжения. Детально исследован процесс подготовки деформационных событий различного типа и выявлены характерные стадии данного процесса. Показано, что изменение кинематических параметров разлома описывается законом эволюции, единым для всех режимов скольжения. Полученные результаты подтверждают ранее высказанный тезис о единой природе деформационных событий различного типа от асейсмического крипа до обычных землетрясений. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что макроскопическим параметром, контролирующим деформационный процесс, является сдвиговая жесткость разлома. Для оценки величины и закономерностей изменения сдвиговой жесткости *in situ* могут быть использованы сейсмические методы.

Ключевые слова: разлом, землетрясение, событие медленного скольжения, лабораторный эксперимент, слайдер-модель, прерывистое скольжение, метод асимптотических координат

Changing kinematic parameters of slip along a model fault in slow and fast deformation events

A.A. Ostapchuk^{1,2}, N.V. Saltykov¹, and V.S. Martynov²¹Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, 119334, Russia²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, 141700, Russia

The paper reports the results of laboratory experiments that examine various deformation modes of a model fault. Modeling is performed for fast slip events corresponding to ordinary earthquakes, as well as for slow slip analogous to low-frequency earthquakes and slow slip events. The preparation of different-type deformation events is studied in detail, and the characteristic stages of this process are determined. It is shown that the change in the kinematic parameters of the fault is described by a law of evolution which is universal for all slip modes. The obtained results confirm the previously stated thesis about the universal nature of different-type deformation events from aseismic creep to ordinary earthquakes. Analysis of the results suggests that the shear stiffness of the fault is a macroscopic parameter governing the deformation process. The shear stiffness value and its variation can be estimated *in situ* via seismic methods.

Keywords: fault, earthquake, slow slip event, laboratory experiment, slider model, stick-slip, asymptotic coordinates method

1. Введение

Нарушенность является главной структурной особенностью земной коры, влияющей на различные геофизические процессы, включая разрушительные землетрясения. По современным представлениям землетрясения, как правило, происходят не в результате образования новых разломов, а в результате проскальзывания блоков по уже существующим нарушениям.

В настоящее время является доказанным существование различных режимов скольжения по разломам. От-

крытие событий медленного скольжения, низкочастотных и очень низкочастотных землетрясений изменяет понимание того, как реализуется упругая энергия деформирования, накопленная в земной коре. При этом землетрясения и медленные деформационные события одними авторами воспринимаются как физически разные явления [1, 2], в то время как другие считают их звеньями единого ряда деформационных явлений [3, 4].

Детальное геолого-структурное изучение разломов показывает, что при землетрясениях динамический раз-

рыв локализуется в очень узкой центральной зоне [5, 6]. Как правило, на участке скольжения аккумулируется определенный объем перетертого гранулированного материала, что определяет необходимость исследования закономерностей деформирования нарушений сплошности на макро-, мезо- и микроуровнях.

Лабораторному исследованию сдвигового деформирования модельных разломов, представляющих собой контакт жестких блоков, разделенных тонким слоем гранулированного материала, посвящено множество работ. Если в процессе скольжения наблюдается вариация фрикционного сопротивления, то при определенных условиях может возникнуть динамическая неустойчивость в виде проскальзывания блока со сбросом накопленных напряжений. Для аналитического описания и численного моделирования многих закономерностей сейсмического цикла часто используется модель прерывистого скольжения с соотношениями, в той или иной степени базирующимися на эмпирическом *rate & state* законе трения [7–10].

В последние годы все большее внимание уделяется установлению условий формирования медленных деформационных событий. Было исследовано влияние на режим деформирования модельного разлома множества факторов: полидисперсности гранул заполнителя, присутствия в нем пластичных минералов, наличия флюида и его вязкости, порового давления и др. [11–16]. Большинство моделей, объясняющих формирование медленных деформационных событий, в основе своей также опираются на *rate & state* закон трения. Можно выделить два основных типа моделей. Первый тип моделей предполагает вариацию фрикционных свойств поверхности раздела при изменении скорости относительного смещения берегов. Так, если при малых скоростях смещения для некоторых типов контактов характерно скоростное разупрочнение — снижение величины сопротивления сдвигу с ростом скорости скольжения, то при высоких скоростях наблюдается обратный эффект. Такой тип фрикционного поведения наблюдался при лабораторном исследовании свойств образцов глинки трения, извлеченной в результате глубинного бурения Нанкайского желоба [17]. Второй тип моделей предполагает пространственную вариацию фрикционных свойств, т.е. различные области межблокового контакта характеризуются либо скоростным упрочнением, либо скоростным разупрочнением. Так, например, А. Фагерент и Р. Сибсон показали, что неоднородность структуры меланжа субдукционной зоны вызывает пространственные вариации реологических свойств и тем самым обуславливает изменение преобладающего режима деформирования [18]. При этом структура и соотношение между различными компонентами, заполняющими разлом, оказывают сильное влияние на распределение скоростей деформаций и определяют сейсмический ре-

жим. Также стоит выделить работы, в которых представлен иной тип моделей. В условиях скоростного разупрочнения формирование определенного режима скольжения и величина приведенной излученной энергии определяются соотношением двух параметров — сдвиговой жесткости нарушения сплошности на стадии разгрузки k_s и жесткости смещающего массива K [14, 19]. В области $k_s/K < 1$ реализуется режим стабильного скольжения, при $k_s/K \sim 1$ — события медленного скольжения, при $k_s/K > 1$ — быстрые деформационные события, интенсивность которых увеличивается с ростом величины k_s/K .

Другим важным аспектом исследования событий быстрого и медленного скольжения является выявление предвестников этих явлений на основе определения закономерностей пространственно-временных вариаций параметров разлома в ходе деформационного цикла. Изменение напряженного состояния в результате медленных событий может являться триггером крупных землетрясений [20, 21]. Возможно, что некоторые области разломных зон могут реализовывать избыточные напряжения в виде быстрых и медленных деформационных событий [16, 22].

При лабораторном исследовании процесса подготовки динамического срыва внимание уделялось закономерностям изменений механических параметров модельного разлома и сейсмоакустическим проявлениям процесса подготовки. В работе [23] оптическим методом исследовались закономерности изменения эффективной площади контакта. Процесс подготовки быстрого события состоял из трех этапов, включая заключительный, описываемый логарифмическим законом изменения эффективной площади контакта. В работе [24] показано, что число микроподвижек берегов модельного разлома и акустических импульсов в процессе подготовки события увеличивается по степенному закону. Аналогичное степенное изменение, но уже сдвиговой жесткости нарушения сплошности показано в работе [25]. Еще одним предвестником быстрых динамических событий выступает «сейсмическое затишь» — уменьшение интенсивности сейсмических колебаний и/или количества акустических импульсов [26]. В немногочисленных работах, посвященных исследованию процесса подготовки медленных деформационных событий, изучены только закономерности излучения акустических импульсов перед медленными событиями [27] и закономерности изменения параметров сейсмических колебаний, прошедших через разлом [28].

В настоящей работе в лабораторных экспериментах детально исследованы закономерности изменения кинематических параметров скольжения модельного разлома в процессе его сдвигового деформирования и пред-

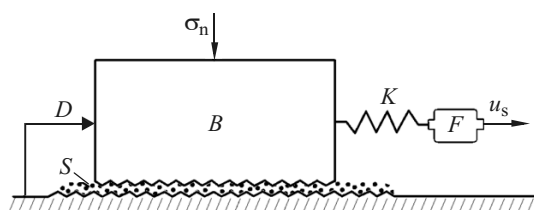


Рис. 1. Схема проведения экспериментов

принята попытка установления единого закона эволюции, описывающего подготовку всех типов деформационных событий.

2. Методика проведения экспериментов

Лабораторные эксперименты проводились на трибологической установке в постановке слайдер-модели, входящей в состав геомеханического стенда лаборатории деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН. В ходе экспериментов гранитный блок с размером $8 \times 8 \times 3 \text{ см}^3$ (B) располагался на гранитном основании (рис. 1). Контакт между шероховатыми поверхностями, берегами модельного разлома, наполнялся слоем гранулированного узкодисперсного заполнителя толщиной 3 мм (S), который в ряде случаев увлажнялся глицерином с вязкостью $0.9 \text{ Па} \cdot \text{с}$, что позволяло сохранять влажность заполнителя неизменной в ходе всего времени проведения эксперимента. Нормальная нагрузка σ_n прикладывалась через специальное приспособление, которое исключало передачу сдвиговых усилий на верхнюю грань подвижного блока. Величина σ_n варьировалась в диапазоне от 30 до 160 кПа. Сдвиговое усилие прикладывалось к блоку через пружинный элемент с жесткостью 17 и 60 кН/м (K), который деформировался с постоянной скоростью u_s равной 20 мкм/с. Скорость деформирования u_s задавалась электрическим приводом с комплексным редуктором, что позволяло выдерживать скорость деформирования с высокой точностью.

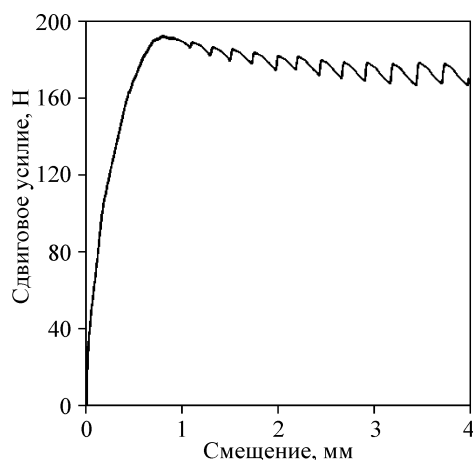


Рис. 2. Пример реологической кривой модельного разлома

В ходе экспериментов проводились измерения сдвигового усилия, действующего на верхний блок и смещения блока относительно основания. Точность измерений составляла соответственно $\pm 1 \text{ Н}$ и $\pm 0.1 \text{ мкм}$ в диапазоне частот 0–5 кГц. Пример реологической кривой модельного разлома, построенной по результатам измерений в одном из экспериментов, представлен на рис. 2.

Для детального анализа выбран запредельный участок реологической кривой как аналог деформационного процесса на сформировавшемся разломе [29, 30]. На запредельном участке прочность модельного разлома выходит на свое остаточное значение, а при использовании узкодисперсного заполнителя деформационные события повторяются квазипериодически [12].

3. Полученные результаты

Варьируя условия проведения экспериментов, нам удалось реализовать полный спектр режимов деформирования — от стабильного до прерывистого скольжения. При нестабильном скольжении модельного разлома в ходе одного эксперимента реализовывался режим регулярно повторяющихся деформационных событий одного типа. Здесь и далее под деформационным событием понимается акт относительного смещения блоков со скоростью, превышающей скорость деформирования пружины u_s .

На рис. 3 представлен фрагмент записи режима деформирования с регулярно повторяющимися деформационными событиями и обозначены контролируемые параметры.

Проследим закономерности изменения параметров деформационных событий вследствие изменения структуры материала-заполнителя (рис. 4). В качестве заполнителя в данной серии была использована увлажненная глицерином (1 % по массе) смесь кварцевого песка с небольшим количеством глины. Соотношение между компонентами смеси варьировалось. Уровень нормальных напряжений составлял 70 кПа, жесткость пружинного элемента $K = 17 \text{ кН/м}$.

Как было показано в ранее проведенных экспериментах [13, 14], режим скольжения зависит от содержания глины в смеси. Для модельного разлома, заполненного увлажненным кварцевым песком, характерны события с максимальной скоростью $V_{\max} \sim 200 \pm 20 \text{ мм/с}$. Добавление 1 % глины приводит к уменьшению V_{\max} более чем в 2 раза до $76 \pm 4 \text{ мм/с}$. Дальнейшее увеличение содержания глины с 1 до 3 % приводит к уменьшению максимальной скорости на три порядка до $(5.5 \pm \pm 0.8) \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$. При содержании глины 5 % на фоне крипа наблюдаются единичные медленные деформационные события со скоростью $\sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ мм/с}$.

Переход от быстрых деформационных событий к медленным сопровождается уменьшением амплитуды смещения блока относительно основания в процессе

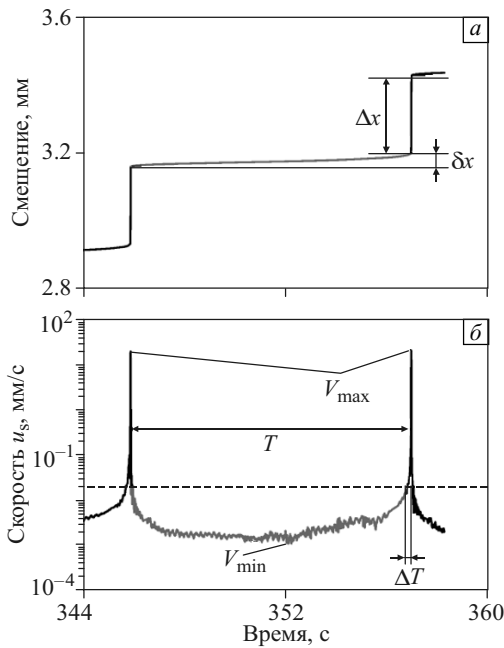


Рис. 3. Фрагмент зависимости смещения (а) и скорости смещения блока (б) от времени на запредельной части реологической кривой, представленной на рис. 2. Пунктирная линия соответствует скорости нагружения упругого элемента u_s

события (Δx на рис. 3). В отличие от величины V_{max} наиболее существенное изменение Δx наблюдается при изменении содержания глины от 0 до 2 %, когда амплитуда смещения уменьшается в 10 раз от 3.30 ± 0.15 до 0.31 ± 0.06 мм. При дальнейшем увеличении содержания пластичного компонента наблюдается слабый рост величины Δx , и при 5%-м содержании она составляет 0.52 ± 0.21 мм. В свою очередь, амплитуда смещения на стадии подготовки эпизода скольжения (δx на рис. 3) монотонно изменяется от 30 ± 3 мкм (для наиболее быстрых событий) до 250 ± 18 мкм (для наиболее мед-

ленных регулярно повторяющихся событий). Соответственно, при переходе от быстрых событий к медленным увеличивается продолжительность эпизодов скольжения (ΔT на рис. 3) от 0.05 до ~ 22 с и уменьшается рекуррентное время (T на рис. 3) от ~ 140 до ~ 20 с.

Значительное влияние на режим деформирования может оказывать и уровень нормальных напряжений. Проследить трансформацию моды деформационных событий вследствие изменения уровня нормальных напряжений можно в окрестности критического уровня нормальных напряжений σ_{ncr} — точки бифуркации Хопфа [31]. При значениях нормальных напряжений $\sigma_n < \sigma_{ncr}$ формируется режим стабильного скольжения. В области $\sigma_n > \sigma_{ncr}$ процесс деформирования модельного разлома неустойчив — после короткой переходной стадии формируется автоколебательный процесс. Амплитуда колебаний не зависит от начальных возмущений, а определяется только параметрами нагружения и характеристиками модельного разлома.

При исследовании влияния уровня нормальных напряжений в качестве заполнителя использовалась увлажненная смесь кварцевого песка (99 %) и глины (1 %). В ходе данной серии экспериментов жесткость пружинного элемента K составляла 60 кН/м. На рис. 5 представлены графики изменения параметров режима деформирования при увеличении уровня нормальных напряжений.

В проведенных экспериментах σ_{ncr} равнялась примерно 25 кПа. При нормальных напряжениях порядка 30 кПа формируются регулярно повторяющиеся события медленного скольжения. Увеличение напряжений приводит к переходу от медленных деформационных событий к быстрым. В проведенных экспериментах максимальная нормальная нагрузка составляла 160 кПа.

Трансформация моды деформационных событий характеризуется плавным изменением параметров событий при росте нормальных напряжений. При увеличе-

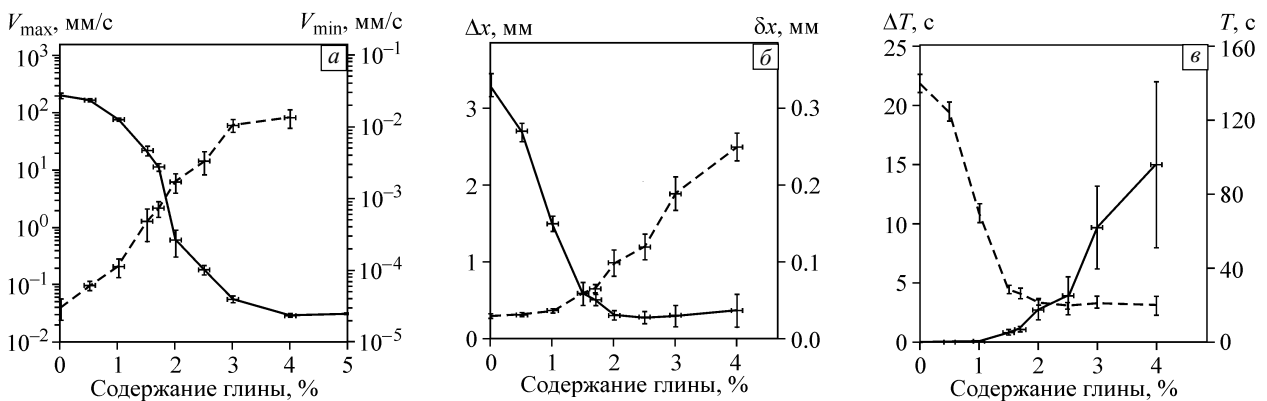


Рис. 4. Изменение параметров режимов деформирования при изменении структуры заполнителя: а — максимальная V_{max} (сплошная) и минимальная V_{min} (пунктир) скорость смещения блока; б — амплитуда смещения во время события Δx (сплошная) и на стадии подготовки δx (пунктир); в — продолжительность события ΔT (сплошная) и рекуррентное время T (пунктир)

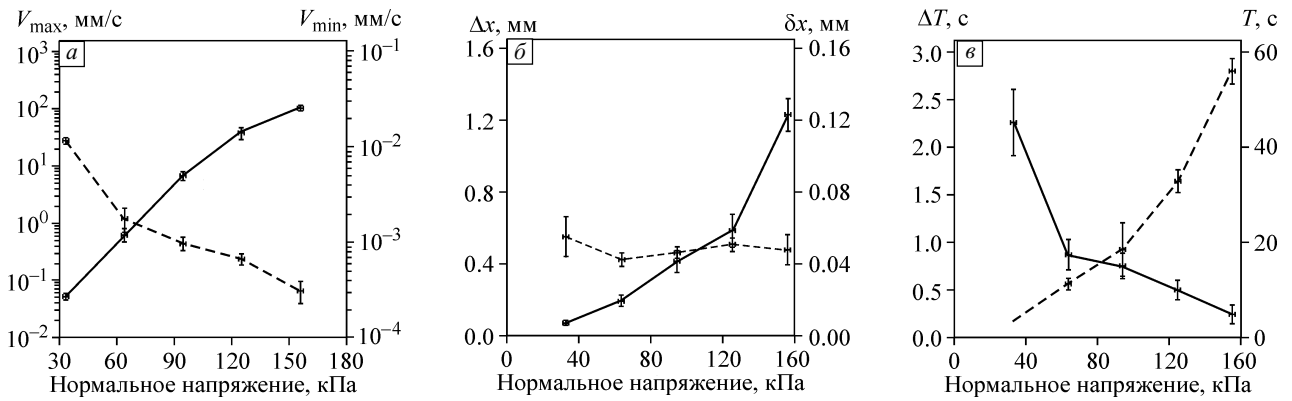


Рис. 5. Изменение параметров режимов деформирования при изменении уровня нормальных напряжений: *a* — максимальная V_{max} (сплошная) и минимальная V_{min} (пунктир) скорость смещения блока; *b* — амплитуда смещения во время события Δx (сплошная) и на стадии подготовки δx (пунктир); *c* — продолжительность события ΔT (сплошная) и рекуррентное время T (пунктир)

нии нормальных напряжений наблюдается рост величины V_{max} от $(5.3 \pm 0.6) \cdot 10^{-2}$ до 102 ± 10 мм/с и снижение V_{min} от $(1.1 \pm 0.9) \cdot 10^{-2}$ до $(3.1 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$ мм/с.

Таким образом, изменение режима скольжения может быть обусловлено как изменением свойств разлома, так и вариацией внешней нагрузки. Анализ приведенных результатов изменения кинематических параметров показывает, что при переходе от медленных деформационных событий к быстрым имеется однозначное соответствие между минимальной и максимальной скоростями смещения блока во всем диапазоне экспериментально реализованных мод деформационных событий (рис. 6).

При проведении экспериментов в постановке слайдер-модели минимальная скорость скольжения может быть выражена через параметры системы следующим образом:

$$V_{min} = u_s \left(1 - \frac{k_0}{K + k_0} \right), \quad (1)$$

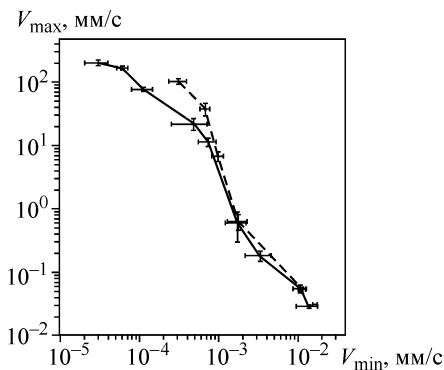


Рис. 6. Корреляция значений минимальной и максимальной скоростей смещения блока во всем диапазоне режимов скольжения. Сплошная линия — серия опытов с различными заполнителями (см. рис. 4), пунктир — при различном уровне нормальных напряжений (см. рис. 5)

где $k_0 = \max(dF/dx)$ — максимальное значение наклона реологической кривой модельного разлома в ходе одного цикла нагрузка–разгрузка на запредельном участке реологической кривой (см. рис. 2). Величина k_0 может варьироваться в широких пределах и весьма чувствительна к изменению структуры и вещественного состава материала-заполнителя. Увеличение содержания пластичных компонентов приводит к уменьшению жесткости разлома и росту величины минимальной скорости V_{min} . В то же время увеличение жесткости приводит к уменьшению минимальной скорости, и при очень высоких значениях жесткости значение V_{min} будет стремиться к 0. Но в условиях непрерывного нагружения модельного разлома величина V_{min} будут принимать значения отличные от нуля при любых режимах деформирования — блок постоянно находится в движении.

Согласно [12], максимальная скорость V_{max} является основным параметром, характеризующим режим скольжения. Поскольку, судя по результатам лабораторного эксперимента, наблюдается однозначное соответствие между минимальной и максимальной скоростями смещения блока (рис. 6), то, следовательно, по величине минимальной скорости скольжения V_{min} можно судить о типе готовящегося деформационного события. При высоких значениях V_{min} вероятна реализация режимов медленного скольжения, тогда как малые значения V_{min} могут свидетельствовать о готовящемся динамическом срыве.

4. Изменение параметров при подготовке деформационных событий

Считается, что геоматериалы и геосреды эволюционируют как самоорганизующиеся синергетические системы [32]. Для выявления сценария эволюции модельного разлома рассмотрим закономерности измене-

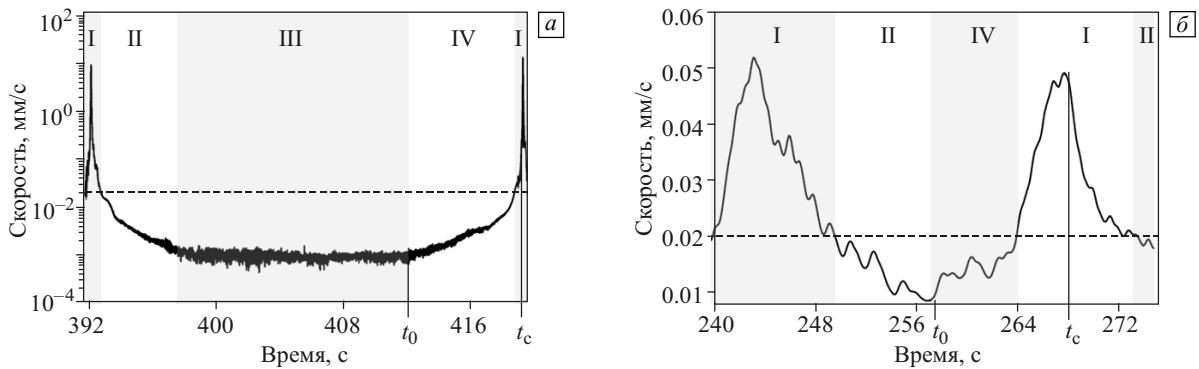


Рис. 7. Закономерности изменения скорости смещения блока при подготовке быстрого (а) и медленного (б) деформационных событий. Пунктирная линия соответствует скорости нагружения u_s . I–IV — характерные стадии цикла нагрузка–разгрузка, t_0 — момент начала стадии разупрочнения контакта, t_c — момент достижения максимальной скорости смещения во время деформационного события

ния скорости смещения блока в ходе одного цикла нагрузка–разгрузка (рис. 7).

Можно выделить несколько характерных стадий процесса эволюции. Первая «косейсмическая» стадия (I на рис. 7) — собственно деформационное событие. Продолжительность этого участка варьируется от 50 мс для быстрых динамических срывов до 15–20 с для событий медленного скольжения. Характерной особенностью стадии является смещение со скоростью более u_s , т.е. происходит снижение приложенного усилия. На второй «постсейсмической» стадии (II) наблюдается торможение блока — скорость существенно уменьшается, несмотря на то что прилагаемое сдвиговое усилие растет. Расчеты показывают, что это снижение не обусловлено инерциальным движением блока, а связано именно с изменением свойств контакта. На данном этапе деформационный процесс может быть описан с помощью уравнения структурной сверхпластичности [33]. Далее наступает период относительной стабильности — «межсейсмическая» стадия (III), когда блок движется с минимальной, примерно постоянной скоростью. Продолжительность данной стадии существенно зависит от типа реализуемых событий: чем больше интенсивность события, тем больше продолжительность межсейсмической стадии. Для наиболее медленных событий этот участок выделить не удастся — после стадии замедления сразу же наблюдается стадия увеличения скорости скольжения или разупрочнения. Продолжительность стадии разупрочнения варьируется от 10 % длительности цикла для быстрых событий до 50 % для медленных.

Плавная трансформация параметров режима деформирования при изменении структуры разлома и уровня нормальных напряжений указывает на общую природу различных типов деформационных событий, которые могут быть описаны в рамках единого формализма. С целью установления аналитической зависимости, удов-

летворительно описывающей изменения скорости блока от времени, мы прибегли к методу асимптотических координат. Данный метод позволяет описать сложную двумерную экспериментальную поверхность в трехмерном пространстве с помощью нескольких существенно более простых плоских кривых [34]. Для построения универсального закона эволюции необходимо рассмотреть скорость смещения блока как функцию двух переменных (времени и минимальной скорости) $V = f(t, V_{\min})$. При таком рассмотрении скорости смещения как функции двух переменных минимальная скорость V_{\min} выступает в роли параметра, определяющего моду деформационных событий.

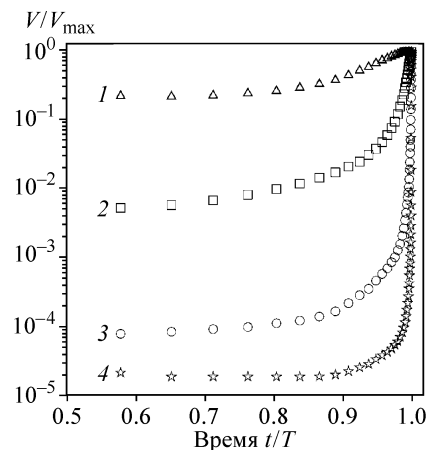


Рис. 8. Изменение скорости смещения блока в процессе эволюции модельного разлома в серии опытов с различными заполнителями межблокового контакта (см. рис. 4). Скорость смещения нормирована на максимальное значение скорости. Время нормировано на соответствующее значение рекуррентного времени. Моменты времени 0 и 1 соответствуют моментам достижения максимальных скоростей во время двух последовательных деформационных событий. Эксперименты с содержанием глины 3.0 (1), 2.0 (2), 1.5 (3), 1.0 % (4)

Закономерности изменения скорости блока со временем, начиная с момента времени t_0 , представлены на рис. 8. При нормировке текущей величины скорости скольжения на максимальное значение V_{\max} можно видеть, что все кривые носят степенной характер изменения и, следовательно, могут быть описаны единым степенным законом изменения.

Использование метода асимптотических координат предполагает выделение в процессе подготовки деформационного события двух характерных точек — моментов времени. В нашем случае, очевидно, в качестве первого характерного момента времени выступает момент t_0 — начало стадии разупрочнения. В качестве второй характерной точки уместно выбрать момент времени t_{av} — момент, когда скорость смещения блока достигает величины среднего геометрического скоростей V_{\min} и V_{\max} : $V(t_{av}) = V_{av} = \sqrt{V_{\min} V_{\max}}$. В результате введения двух функций φ и ξ множество экспериментальных кривых можно свести к одной универсальной кривой. На первом шаге при введении вспомогательной функции φ множество точек $\{(t_0^{(i)}, V_{\min}^{(i)}) | i \in \text{эксперименты одной серии}\}$ вырождается в новых асимптотических координатах в одну точку с координатами $(0, 0)$:

$$\varphi: \{(t_0^{(i)}, V_{\min}^{(i)}) | i \in \text{эксперименты одной серии}\} \rightarrow (0, 0). \quad (2)$$

Аналогично, введение вспомогательной функции ξ приводит к вырождению в одну точку второго множества точек $\{(t_{av}^{(i)}, V_{av}^{(i)}) | i \in \text{эксперименты одной серии}\}$:

$$\xi: \{(t_{av}^{(i)}, V_{av}^{(i)}) | i \in \text{эксперименты одной серии}\} \rightarrow (a, 0.5), \quad (3)$$

где a — определенное характеристическое значение, зависящее от вида функции ξ .

Последовательное двухэтапное преобразование множества исходных зависимостей скорости от времени $V^{(i)} = V^{(i)}(t, V_{\min}^{(i)})$ позволяет получить инвариантную кривую в новых асимптотических координатах (τ, U) , представленную на рис. 9. Подробно методика асимптотических координат описана в работе [34], а с особенностями ее применения к рассматриваемым рядам экспериментальных данных можно ознакомиться в приложении.

На представленном графике характерным значениям скорости смещения блока V_{\min} , V_{av} и V_{\max} соответствуют на оси ординат значения 0.0, 0.5 и 1.0. При этом в области значений $U \in (0.0, 0.5)$ все кривые с высокой степенью точности могут быть описаны линейной зависимостью:

$$U(\tau) = 0.48\tau. \quad (4)$$

Стоит отметить, что отклонение от линейного закона (4) наблюдается только при наиболее быстрых деформационных событиях и только в области скоростей смещения, существенно превышающих скорость нагру-

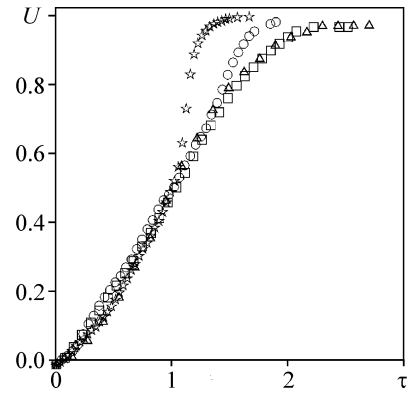


Рис. 9. Вид экспериментальных кривых, представленных на рис. 5 и 8, в асимптотических координатах (τ, U)

жения u_s . Тем самым построенная в асимптотических координатах (τ, U) эволюционная кривая полностью сохраняет структуру и характерные особенности всех кривых исходной серии на плоскости исходных переменных (t, V_{\min}) не только на стадии разупрочнения, но и во время непосредственно деформационного события при невысоких скоростях смещения. Полученный инвариантный вид кривой изменения скорости смещения блока в исходных переменных (t, V_{\min}) имеет следующий аналитический вид:

$$V(t, V_{\min}) = V_{\min} \left(\frac{t_c - t_0}{t_c - t} \right)^{\zeta(V_{\min}/V_{\max})}, \quad t \geq t_0, \quad (5)$$

где функция ζ задается следующим образом:

$$\zeta(v) = v^{0.15} \lg v. \quad (6)$$

Аналогичные инвариантные кривые изменения скорости смещения блока получаются и в серии экспериментов с изменением уровня нормальных напряжений. Выявленные в обоих случаях универсальные законы эволюции скорости блока показывают важность описания всех типов деформационных событий в рамках единого формализма и будут весьма полезны для моделирования и прогнозирования событий различного типа. Важно отметить, что наблюдаемые отклонения кривых от универсального степенного закона в области больших скоростей смещения блока (рис. 9), вероятно, обусловлены особенностями фрикционного взаимодействия. Отклонение начинается только в том случае, когда величина «косейсмического смещения» Δx превышает определенную критическую величину, при которой фрикционное сопротивление разлома достигает минимального (остаточного) значения и не изменяется при увеличении амплитуды косейсмического смещения. Достижение же величины остаточного сопротивления сдвигу характерно только для быстрых деформационных событий [35].

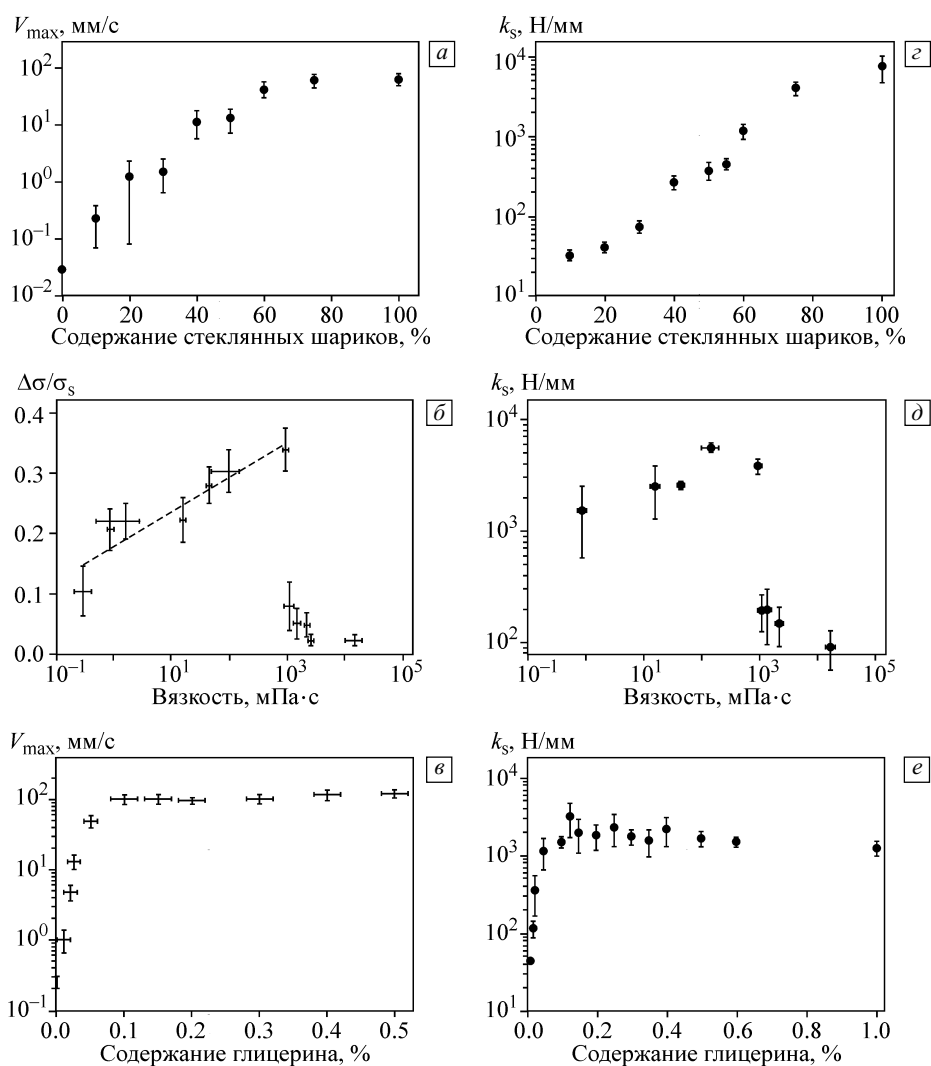


Рис. 10. Сопоставление закономерностей изменения характеристик процесса скольжения (a–в) и скоростей снижения сопротивления сдвигу на стадии разгрузки (г–е) от различных параметров [38]

5. Обсуждение

У разных режимов скольжения по разлому наблюдается различная эффективность событий как сейсмических источников [4, 14]. Проведенные эксперименты указывают на возможность оценки интенсивности сейсмических колебаний, излучаемых при сдвиге по разлому на основе анализа кинематических параметров на стадии его подготовки. В процессе деформирования механические характеристики разлома непрерывно изменяются и закономерности их изменения определяют четыре стадии цикла. При этом наблюдается однозначное соответствие между скоростью деформирования модельного разлома на стадии относительной стабильности (V_{\min}) и максимальной скоростью смещения в косейсмической фазе (V_{\max}).

Закономерности изменения механических характеристик модельного разлома определяются процессами,

происходящими в узкой зоне межблокового контакта. Возникновение деформационных событий связано с возможностью формирования расположенных поперек модельного разлома конгломератов нагруженных частей [12, 36]. Совокупность всех таких конгломератов формирует единый силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. В ранее проведенных исследованиях показано, что закономерности деформационного процесса определяются процессами самоорганизации межблокового контакта и в зависимости от пространственной структурированности силового скелета могут существенно изменяться [33, 37]. В процессе деформирования изменение механических характеристик разлома сопровождается структурными изменениями разлома на микро- и мезоуровнях. Данные структурные изменения, в свою очередь, сопровождаются излу-

чением упругих колебаний в широком диапазоне частот [27].

Чувствительным геомеханическим параметром — индикатором стадии эволюции разлома — является сдвиговая жесткость $k = d\tau/dW$, где τ — сдвиговые эффективные напряжения, действующие в окрестности разрыва; W — относительное смещение его берегов [25]. В ходе цикла деформирования можно выделить два характерных значения сдвиговой жесткости: k_0 — максимальная жесткость на стадии нагружения и k_s — максимальная жесткость на стадии разгрузки или, точнее, максимальная скорость снижения сопротивления сдвигу в процессе относительного смещения берегов. Для экспериментов в постановке слайдер-модели величина k_0 определяет минимальную скорость деформирования разлома V_{\min} . В то же время, согласно [38], величина k_s определяет долю упругой энергии деформации, излучаемой в виде сейсмических волн, и хорошо коррелирует с максимальной скоростью смещения V_{\max} (рис. 10).

Универсальность эволюционного закона и корреляция значений скорости смещения V_{\min} и V_{\max} указывают на то, что существует однозначное соответствие между жесткостями k_0 (параметром, контролирующим процесс деформирования на стадии нагружения) и k_s (параметром, определяющим реализацию определенной моды деформационного события). В отличие от V_{\min} , для природных разломов величина жесткости k_0 может оценена сейсмическими методами — по результатам измерения параметров сейсмических колебаний, прошедших через разлом или отраженных от него [39, 40]. Наилучшие результаты в данном случае достигаются в тех случаях, когда измерения производятся на профиле, пересекающем разломную зону. Однако надежных данных, содержащих результаты измерений величины сдвиговой жесткости, мало. Другим методом, подходящим для диагностики жесткости, по сравнению с использованием искусственных источников сейсмических колебаний, может оказаться метод кросс-корреляции длинных записей микросейсмического фона между станциями, расположенными на разных берегах разломов. Анализ амплитудных соотношений между когерентными составляющими волновых полей до и после разлома демонстрирует хорошую чувствительность и обеспечивает возможность перманентного контроля характеристик среды [41].

6. Заключение

Проведенные модельные эксперименты позволили выявить новые важные закономерности процесса эволюции разломов. Результаты опытов не только подтвердили положение о непрерывности ряда мод деформационных событий от событий медленного скольжения до быстрых динамических срывов [3, 4], но и позволили

выявить универсальный закон эволюции модельного разлома. Проведенный с помощью метода асимптотических координат анализ полученных данных показал, что изменение скорости скольжения модельного разлома в процессе нагружения описывается степенным законом изменения и показатель степени определяется типом готовящегося деформационного события. Выявленная универсальность эволюционного закона указывает на принципиальную необходимость рассмотрения быстрых и медленных деформационных событий в рамках единого формализма [33].

В процессе эволюции разлома индикатором напряженно-деформированного состояния является его сдвиговая жесткость. Выявленное соответствие между жесткостью разлома на стадии нагрузки k_0 и скоростью снижения сопротивления сдвигу в процессе относительного смещения берегов k_s делает актуальным использование величины сдвиговой жесткости при построении геомеханических моделей разломов, а также для оценки интенсивности готовящихся сейсмических событий, приуроченных к локальному участку разлома.

Лабораторные эксперименты с различной структурой материала-заполнителя (Н.В. Салтыков) выполнены при поддержке РФФ (проект № 16-17-00095). Эксперименты с различным уровнем нормальных напряжений (В.С. Мартынов), анализ и обработка экспериментальных данных (А.А. Остапчук) выполнены при поддержке РФФИ (проект № 17-05-01271).

Литература

1. 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.
2. Ghaffari H.O., Young R.P. Acoustic-friction networks and the evolution of precursor rupture fronts in laboratory earthquakes // *Sci. Rep.* – 2013. – V. 3. – P. 1799.
3. Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // *Nat. Geosci.* – 2010. – V. 3. – P. 599–607.
4. 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*. – 2010. – V. 5. – No. 4. – P. 863–891.
5. Shipton Z.K., Evans J.P., Abercrombie R.E., Brodsky E.E. The Missing Sinks: Slip Localization in Faults, Damage Zones, and the Seismic Energy Budget // *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting* / Ed. by R. Abercrombie. – Washington, DC: AGU, 2006. – P. 217–222.
6. Ружич В.В. Очаг землетрясения как объект геологического изучения // *Физика Земли*. – 2009. – № 11. – С. 60–68.
7. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // *Science*. – 1966. – V. 153. – P. 990–992.
8. Понов 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.
9. Dublanche P., Bernard P., Favreau P. Interactions and triggering in a 3-D rate-and-state asperity model // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2013. – V. 118. – P. 2225–2245.
10. Будков А.М., Кочарян Г.Г. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела.

- Часть 3. Численное моделирование // Физ. мезомех. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 86–92.
11. Anthony J.L., Marone C. Influence of particle characteristics on granular friction // *Geophys. Res. Lett.* В. – 2005. – V. 110. – P. 08409.
 12. 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.
 13. Saffer D.M., Marone C. Comparison of smectite- and illite-rich gouge frictional properties: application to the updip limit of the seismogenic zone along subduction megathrusts // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2003. – V. 215. – P. 219–235.
 14. Kocharyan G.G., Novikov V.A., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments // *Geophys. J. Int.* – 2017. – V. 208. – P. 521–528.
 15. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Влияние вязкости тонких пленок флюида на закономерности фрикционного взаимодействия блоков горной породы // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 463. – № 3. – С. 343–346.
 16. Ружич В.В., Псахье С.Г., Смекалин О.П., Шилько Е.В., Астафуров С.В. Изучение влияния водонасыщения и вибраций на режим смещений в зонах разломов // Физ. мезомех. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. 2. – С. 257–260.
 17. Ikari M.J., Marone C., Saffer D.M., Kopf A.J. Slip weakening as a mechanism for slow earthquakes // *Nat. Geosci.* – 2013. – V. 6. – P. 468–472.
 18. Fagerent A., Sibson R.H. Melange rheology and seismic style // *Geology.* – 2010. – V. 38. – No. 8. – P. 751–754.
 19. Leeman J.R., Saffer D.M., Scuderi M.M., Marone C. Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes // *Nat. Commun.* – 2016. – V. 7. – P. 11104.
 20. Radiguet M., Perfettini H., Cotte N., Gualandi A., Valette B., Kostoglodov V., Lhomme T., Walpersdorf A., Cabral-Cano E., Campillo M. Triggering of the 2014 Mw7.3 Papanao earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico // *Nat. Geosci.* – 2016. – V. 9. – P. 829–833.
 21. Uchida N., Iinuma T., Nadeau R.M., Burgmann R., Hino R. Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan // *Science.* – 2016. – V. 351. – No. 6272. – P. 488–492.
 22. Veedu D.M., Barbot S. The Parkfield tremors reveal slow and fast ruptures on the same asperity // *Nature.* – 2016. – V. 532. – P. 361–365.
 23. Ben-David O., Rubinstein S.M., Fineberg J. Slip-stick and the evolution of frictional strength // *Nature.* – 2010. – V. 463. – P. 76–79.
 24. Johnson P.A., Ferdowsi B., Kaproth B.M., Scuderi M., Griffa M., Carmeliet J., Guyer R.A., Le Bas P.-Y., Trugman D.T., Marone C. Acoustic emission and microslip precursors to stick-slip failure in sheared granular material // *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – V. 40. – P. 5627–5631.
 25. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. Variations in rupture zone stiffness during a seismic cycle // *Dokl. Earth Sci.* – 2011. – V. 441. – P. 1591–1594.
 26. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
 27. Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krashennikov A.V. Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation // *Acoust. Phys.* – 2016. – V. 62. – P. 505–513.
 28. Scuderi M.M., Marone C., Tinti E., Di Stefano G., Collettini C. Precursory changes in seismic velocity for the spectrum of earthquake failure modes // *Nature Geosci.* – 2016. – V. 9. – P. 695–700.
 29. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломных зон. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 419–440.
 30. Герасимова Т.И., Кондратьев В.Н., Кочарян Г.Г. Модельные исследования особенностей сдвигового деформирования трещин, содержащих заполнитель // ФТПРПИ. – 1995. – № 4. – С. 61–68.
 31. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature.* – 1998. – V. 391. – P. 37–42.
 32. Макаров П.В. Эволюционная природа деструкции твердых тел и сред // Физ. мезомех. – 2007. – Т. 10. – № 3. – С. 23–38.
 33. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В., Виноградов Е.А., Камай А.М., Марков В.К. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 2. Полевые эксперименты и феноменологическая модель явления // Физ. мезомех. – 2015. – Т. 18. – № 6. – С. 75–85.
 34. Систер В.Г., Дильман В.В., Полянин А.Д., Вязьмин В.А. Комбинированные методы химической технологии и экологии. – Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 1999. – 335 с.
 35. Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 467. – № 1. – С. 86–90.
 36. Drescher A., de Josselin de Jong G. Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1972. – V. 20. – P. 337–340.
 37. Morgan J., Boettcher M. Numerical simulations of granular shear zones using the distinct element method // *J. Geophys. Res.* В. – 1999. – V. 104. – No. 2. – P. 2721–2732.
 38. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. – М.: ГЕОС, 2016. – 424 с.
 39. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 23–42.
 40. Сливак А.А. Оценка жесткости разломных зон земной коры на основе сейсмических данных // Физика Земли. – 2011. – № 7. – С. 44–53.
 41. Brenguier F., Campillo M., Hadziioannou C., Shapiro N.M., Nadeau R.M., Larose E. Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations // *Science.* – 2008. – V. 321. – P. 1478–1481.

Приложение

Рассмотрим процесс изменения кинематических параметров модельного разлома на стадиях IV и I цикла нагрузка–разгрузка с момента t_0 до момента времени t_c (см. рис. 8). При нормировке текущей величины скорости смещения блока на максимальное значение V_{\max} можно видеть, что все зависимости приведенной скорости от времени имеют схожий характер (отношение V/V_{\max} растет как степенная функция времени), а следовательно, могут быть описаны единым эволюционным законом.

Для построения универсального закона эволюции рассмотрим скорость смещения блока как функцию двух переменных (времени и минимальной скорости) $V = f(t, V_{\min})$. Напомним, что минимальная скорость V_{\min} является параметром, определяющим режим скольжения модельного разлома.

Для удобства последующих преобразований перейдем к безразмерным переменным скорости и времени:

$$\tilde{V} = \lg(V/V_{\max}), \quad \tilde{t} = -\lg[(t_0 - t_c)/(t - t_c)]. \quad (\text{П1})$$

В координатах (\tilde{t}, \tilde{V}) все кривые $\tilde{V}^{(i)}(\tilde{t}, \tilde{V}_{\min}^{(i)})$ ($\tilde{V}_{\min}^{(i)} = \lg(V_{\min}^{(i)}/V_{\max}^{(i)})$) имеют общую область определения $D(\tilde{V}^{(i)}) = [0, \infty)$, i — эксперименты одной серии.

С целью приведения зависимостей $\tilde{V}^{(i)}(\tilde{t}, \tilde{V}_{\min}^{(i)})$ к одинаковым предельным значениям в точках $\tilde{t} = 0$ и

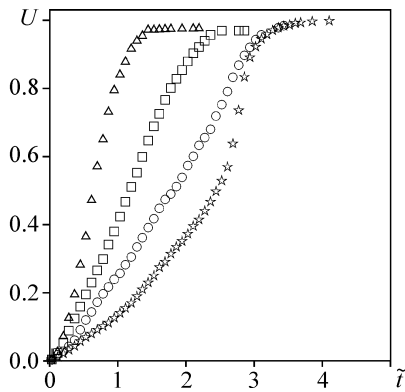


Рис. П1. Вид экспериментальных кривых после первого шага метода асимптотических координат в координатах (\tilde{t}, U)

$\tilde{t} = \infty$ введем вспомогательную функцию φ :

$$U = \varphi(\tilde{V}) = \frac{\tilde{V}(\tilde{t}, \tilde{V}_{\min}) - \mu(\tilde{V}_{\min})}{\nu(\tilde{V}_{\min}) - \mu(\tilde{V}_{\min})}, \quad (\text{П2})$$

где функции μ и ν определяются асимптотикой кривых при $\tilde{t} \rightarrow 0$ и $\tilde{t} \rightarrow \infty$:

$$\mu(\tilde{V}_{\min}^{(i)}) = \lim_{\tilde{t} \rightarrow 0} \tilde{V}(\tilde{t}, \tilde{V}_{\min}^{(i)}) = \tilde{V}_{\min}^{(i)}, \quad (\text{П3})$$

$$\nu(\tilde{V}_{\min}^{(i)}) = \lim_{\tilde{t} \rightarrow \infty} \tilde{V}(\tilde{t}, \tilde{V}_{\min}^{(i)}) = 0. \quad (\text{П4})$$

Именно использование предельных значений экспериментальных кривых лежит в основе метода асимптотических координат. Полученный вид экспериментальных

кривых в координатах (\tilde{t}, U) представлен на рис. П1. В результате первого шага получаем семейство кривых, выходящих из $\tilde{t} = 0$ и имеющих одинаковую асимптотику при $\tilde{t} \rightarrow \infty$.

Применение второй вспомогательной функции ξ направлено на «стягивание» экспериментальных кривых в точках $(t_{\text{av}}^{(i)}, V_{\text{av}}^{(i)})$, что соответствует в координатах (\tilde{t}, U) значениям $(\tilde{t}_{\text{av}}^{(i)}, 0.5)$. Функция ξ определяется следующим образом:

$$\tau = \xi(\tilde{t}) = \frac{\tilde{t}}{\kappa(\tilde{V}_{\min}^{(i)})}, \quad (\text{П5})$$

где функция κ определяется как множество точек пересечений семейства экспериментальных кривых в координатах (\tilde{t}, U) с прямой $U = 0.5$:

$$U(\kappa(\tilde{V}_{\min}^{(i)}), \tilde{V}_{\min}^{(i)}) = U(t_{\text{av}}^{(i)}, \tilde{V}_{\min}^{(i)}) = 0.5. \quad (\text{П6})$$

Аналитическая запись функции $\kappa(\tilde{V}_{\min}^{(i)})$, полученная по представленным на рис. П1 зависимостям, имеет следующий вид:

$$\kappa(\tilde{V}_{\min}^{(i)}) = 0.49 \exp(-0.34 \tilde{V}_{\min}^{(i)}). \quad (\text{П7})$$

Применение вспомогательной функции ξ приводит к инвариантному виду кривой в асимптотических координатах (τ, U) (см. рис. 9).

Стоит отметить, что вспомогательные функции μ , ν и κ играют роль «граничных» условий для исходной серии кривых и будут различными для других серий кривых, имеющих качественно аналогичный характер.

Поступила в редакцию
17.04.2017 г.

Сведения об авторах

Остапчук Алексей Андреевич, к.ф.-м.н., снс ИДГ РАН, ostapchuk@idg.chph.ras.ru
Салтыков Николай Вадимович, асп. ИДГ РАН, nick.saltykov@gmail.com
Мартынов Василий Сергеевич, студ. МФТИ, vasilii.martynov@phystech.edu