

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ПРОЦЕСС СЕЙСМОГЕННОГО РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЯ

А.А. Будков, Г.Г. Кочарян

Модель Барриджа-Кнопова с трением, описываемым модифицированным законом “Rate and State”, применена для исследования процесса распространения разрыва по разлому, состоящему из участков с различными закономерностями переходного процесса от трения покоя к трению скольжения. Показано, что старт сейсмогенного разрыва всегда происходит на участке неустойчивого скольжения, хотя динамическая подвижка может быть инициирована событиями медленного скольжения на соседних участках. Важную роль при остановке разрыва могут играть участки с переходными фрикционными характеристиками. Свободно распространяясь по участкам стабильного скольжения, разрыв быстро затухает на участке с реологическими свойствами, характерными для событий медленного скольжения.

Введение

Существующая парадигма теории землетрясений восходит к работам Гильберта, результаты которых были обобщены Г. Рейдом [Reid, 1910]. Основное ее положение состоит в том, что землетрясение есть результат динамического проскальзывания на заранее существующем геологическом разломе. При этом кумулятивное смещение по сейсмогенному разлому набирается суммированием кратковременных проскальзываний при землетрясениях, которые происходят периодически на активном разломе или его сегменте. Сегодня такой подход почти безоговорочно принимается как в сейсмологии, так и в геодинاميке, хотя в деталях воззрения разных научных школ и групп специалистов во многом расходятся.

Один из традиционных подходов в рамках этих представлений восходит к работам Ч. Тсубои, который на основе геодезических измерений оценил максимальную величину изменения деформации коры в результате крупного землетрясения и неявно предположил, что землетрясение сбрасывает напряжение в окрестности разлома до нуля, аналогично трещине растяжения. Такой подход распространился достаточно широко, так что в некоторых публикациях, например [Chinnery, 1964], прочность земной коры приравнивалась к сбросу напряжений при землетрясениях. Хотя в настоящее время в явном виде данный подход практически не используется, его «отголоски» можно обнаружить, например, в предложенной в конце 70-х годов прошлого столетия концепции существования прочных и слабых участков разлома. В этих моделях вариации параметров скольжения в пределах разрыва связываются с распределением по поверхности разлома «сильных» областей, названных 'барьерами' и 'asperity' [Das, Aki, 1977; Kanamori, Stewart 1976]. Размер 'asperities' на разломе связывали с возможным размером землетрясений, которые могут на нем произойти, а занимаемую ими долю поверхности с соотношением между вкладом косейсмического и асейсми-

ческого скольжений в величину сейсмического момента, реализуемого на разломе. В этих, как полагают, наиболее прочных областях отмечается самый высокий уровень реализации сейсмического момента.

Подходы, используемые в теории землетрясений, заметно изменились, когда в качестве альтернативы была предложена теория прерывистого скольжения. В 1966 г. У. Брейс и Дж. Байерли высказали предположение, что землетрясения являются актами динамически неустойчивого проскальзывания, периодически повторяющимися на существовавших ранее поверхностях скольжения, [Brace, Byerlee, 1966]. После этого законы трения при квазистатических и динамических сдвигах нарушений сплошности массивов горных пород стали предметом повышенного внимания как в механике скальных пород, так и в сейсмологии. Интенсивные лабораторные и численные эксперименты привели к существенной эволюции кулоновских представлений о сухом трении. По результатам экспериментальных исследований, проведенных в 70–80-х годах минувшего столетия, вместо ступенчатого перехода трение покоя – трение скольжения была [Dieterich, 1979] выдвинута концепция трения, зависящего от скорости, перемещения и времени, и предложен эмпирический закон сопротивления сдвигу «Rate & State friction law» (далее «RS»), который стал основным, почти единственным инструментом теоретического исследования и численного моделирования режимов скольжения по разломам [Lapusta, Rice, 2003; Будков, Кочарян, 2016 и многие другие]. Stick-slip гипотеза формулируется компактной системой уравнений, исследование которых предсказывает широкий спектр деформационных явлений на разломах качественно, а иногда и количественно, находящихся в соответствии с результатами наблюдений. «Прочностная» же модель типа «asperities» остается в большей степени описательной. В последнее время делаются попытки объединения этих двух моделей в рамках единой схемы, одна из которых предпринята в данной статье.

Режимы скольжения по разлому

Проведенные в последние годы исследования показали, что в определенном диапазоне параметров даже небольшие вариации таких характеристик магистральной зоны разлома, как материальный и гранулометрический состав заполнителя, свойства увлажняющего флюида, его вязкость и так далее способны радикально изменить характер скольжения по разлому – от фрикционной неустойчивости (stick-slip) до стабильного скольжения [Кочарян и др., 2013; Кочарян, Новиков, 2015 и др.]. Кроме того, существуют промежуточные режимы условно стабильного скольжения, медленного прерывистого скольжения и т.д. Различные режимы скольжения имеют разную скорость распространения разрыва от обычной в механике трещин величины близкой к скорости волны Релея, до сверхмалых скоростей порядка 10^{-4} – 10^{-6} км/с при так называемых «событиях медленного скольжения» [Кочарян и др., 2014]. Соответственно, величины «сейсмического КПД» этих деформационных событий также различаются на много порядков. В качестве сейсмической эффективности удобно рассматривать величину отношения $e = E_s / M_0$, где E_s – величина энергии, излученной в ходе подвижки по разлому, а M_0 – реализованный сейсмический момент.

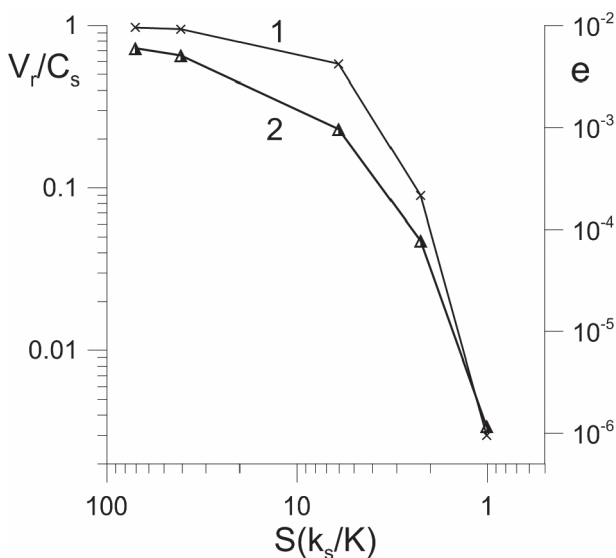


Рис. 1. Зависимость скорости распространения разрыва (1) и величины приведенной кинетической энергии (2) от отношения жесткостей лабораторного разлома и массива

Одним из главных параметров, определяющих эффективность перехода запасенной упругой энергии в сейсмическое излучение, является соотношение между максимальным значением скорости снижения сопротивления сдвигу на предельной ветви деформирования разлома (максимальной сдвиговой жесткости) и жесткостью массива.

На рис. 1 приведена зависимость эффективной скорости распространения разрыва от отношения жесткостей лабораторного разлома и приводящей пружины, играющей роль массива горных пород, рассчитанной на основе рассмотрения энергетического баланса различных режимов скольжения в экспериментах со слайдер-моделью. Здесь же показана величина приведенной энергии деформирования, перешедшей в кинетическую энергию блока. Подробности эксперимента изложены в статье [Адушкин и др., 2016]. Как видно из графика, и «сейсмическая» энергия и скорость распространения разрыва радикально снижаются при уменьшении величины отношения Sk_s / K . Тем самым режим скольжения постепенно трансформируется из прерывистого в стабильный.

Кроме изменения отношения жесткостей, трансформация режима скольжения может быть осуществлена посредством изменения параметров вышеупомянутого закона трения «Rate & State». Однако крупным недостатком этого эмпирического закона является то обстоятельство, что в отличие от жесткости разлома, его основные параметры, за исключением, пожалуй, характерной величины критического смещения D_c , не могут быть интерпретированы физически ни в лабораторных, ни, тем более, в натурных условиях. Соответственно, не может быть и речи о прогнозе этих характеристик для конкретной разломной зоны.

Начало и остановка сейсмогенного разрыва

Существующие представления о старте и остановке сейсмогенных разрывов не дают однозначного ответа о природе этих явлений, хотя спектр предлагаемых моделей весьма широк. Стохастические модели представляют землетрясения как разрывы, случайным образом растущие и уничтожаемые. Для малых землетрясений остановка происходит на ранней стадии развития. В моделях этого типа невозможно предсказать конечный размер разрыва при его инициировании. В другом классе моделей предполагается, что большие землетрясения отличаются от малых даже на начальной стадии развития разрыва [Spudich, Cranswick, 1984].

Многие авторы придерживаются мнения, что конечной точкой разрыва является область, в которой трасса активного разлома претерпевает резкий изгиб или ступенчатый скачок [Sibson, 1985; Wesnousky, 2006]. Исследовав карты поверхностных разрывов 22 землетрясений с длинами разрывов в диапазоне 10–420 км, S. Wesnousky пришел к заключению, что существует характерный размер ступенчатого скачка на трассе разлома ~3–4 км. Ступень большего размера распространяющийся разрыв преодолеть не в состоянии.

Представления о зарождении и остановке разрыва тесно связаны с концепцией 'барьеров' или 'asperity'. В ранних работах предполагалось, что землетрясения начинаются и заканчиваются именно на этих особых участках разлома [Shibazaki, Matsu'ura, 1992]. Позже, на основании некоторых результатов анализа начальных участков сейсмограмм, зарегистрированных в ближней зоне землетрясений, было выдвинуто другое предположение, что область зарождения землетрясений располагается как раз на слабых участках разлома, оптимальным образом ориентированных относительно поля напряжений [Iio, 2010]. Проведенные недавно численные расчеты [Weng et al., 2015] показали, что барьер может замедлить или остановить косейсмические разрывы, но может также и инициировать разрывы, распространяющиеся со скоростью выше C_s . Такое различие определяется, по мнению [Weng et al., 2015], размерами барьера.

Различие в прочности между «сильными» и «слабыми» участками разлома может возникнуть, скорее всего, только из-за вариации нормального давления. Величина статического коэффициента трения, который определяет предельное сдвиговое напряжение, при больших давлениях изменяется довольно слабо, а сцепление при этом не вносит значительного вклада в значение предельной прочности. Это заставляет предполагать наличие значительных вариаций уровня нормальных напряжений: увеличения за счет концентрации напряжений и снижения за счет высокого порового давления флюида (пережатый флюид) [Киссин, 2009]. Следует подчеркнуть, что на небольших глубинах, например, для природно-техногенных землетрясений, подобные предположения едва ли оправданы. Это заставляет усомниться в универсальности концепции «прочностных барьеров» или «мягких и жестких включений». Более подходящим нам представляется предположение о наличии «фрикционных неоднородностей», то есть участков с различными фрикционными свойствами. При этом различия фрикционных свойств понимаются не столько как различия коэффициентов трения, сколько как различия закономерностей переходного процесса от трения покоя к трению скольжения.

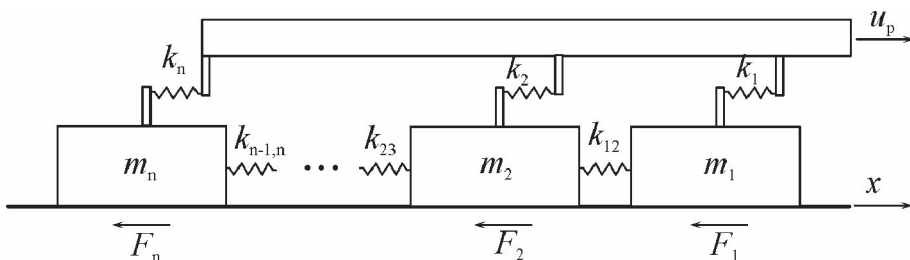


Рис. 2. Модель Барриджа – Кнопова

Модель

Использованная в настоящей работе модель представляет собой вариант предложенной Барриджем и Кноповым схемы [Barridge, Knopoff, 1967], которую часто используют как базовую модель генерации землетрясений. Система из произвольного количества блоков, связанных упругими элементами с жесткостью $k_{n-1,n}$ между собой, деформируется управляющей силой, прикладываемой со стороны плиты, движущейся с постоянной скоростью через пружины жесткостью k_n (рис. 2). Блоки расположены на массивном основании, с которым взаимодействуют посредством сил трения F_n .

Эта модель была применена для исследования процесса распространения разрыва по разлому, состоящему из участков с различными закономерностями переходного процесса от трения покоя к трению скольжения. Для задания силы трения использовалась модифицированная «R& S» модель [Deiterich, 1979; Будков, Кочарян, 2016], согласно которой сила сопротивления сдвигу представляется в виде:

$$F_s = \sigma_N \cdot S \cdot \left[\mu_0 + a \ln \left(\frac{|\dot{x}|}{u^*} \right) + b \ln \left(\frac{u^* \theta}{D_c} \right) \right] + \frac{\eta_d \cdot S \cdot \dot{x}}{d}, \quad (1)$$

где μ_0 – коэффициент трения, соответствующий стабильному скольжению со скоростью u^* ; a , b , D_c – эмпирические константы, θ – переменная состояния, $\dot{x}$ – скорость перемещения, η_d – коэффициент динамической вязкости межблокового контакта; S , d – площадь и толщина контактной зоны. Переменная состояния θ определяется из кинетического уравнения:

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

В состоянии стабильного скольжения с некоторой скоростью $\dot{x} = u_0$ переменная состояния θ принимает значение $\theta = \frac{D_c}{u_0}$. Это значение в дальнейшем

используется в качестве начального условия при решении уравнения (1).

По сравнению с канонической моделью «R& S», соотношение (1) содержит член с вязкостью, что позволяет моделировать широкий спектр режимов сдвигового деформирования, в том числе и «медленные» движения [Будков, Кочарян, 2016].

Уравнения движения данной системы могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} m_1 \bar{x}_1 &= k_1(u_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_1 \\ m_2 \bar{x}_2 &= k_2(u_0 t - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - F_2 \\ &\dots\dots\dots \\ m_n \bar{x}_n &= k_n(u_0 t - x_n) + k_{n-1,n}(x_{n-1} - x_n) - F_n \end{aligned} \quad (3)$$

где m_i , x_i – соответственно масса и смещение i -го блока, а $F_i = \mu F_{Ni}$ – действующая на него сила трения (μ – коэффициент трения, F_{Ni} – сила нормального давления).

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (3) совместно с уравнениями (1) и (2) решалась численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка аппроксимации. В описываемой серии расчетов считалось, что масса и базовый коэффициент трения $\mu_0 = 0,4$ одинаковы для всех блоков так же, как и жесткости межблоковых связей $k_b = 10^6$ Н/м и ведущих пружин $k_s = 10^4$ Н/м. Константы в уравнении (1) были подобраны таким образом, чтобы часть блоков двигалась в режиме упрочнения или стабильного скольжения ($a = 0,0015$, $b = 0,0009$), а часть – в режиме неустойчивого, прерывистого скольжения ($a = 0,004$, $b = 0,06$). Мы предположили, что блоки с нестабильным трением в природе соответствуют участкам разлома, которые называют “asperities”. Величина критического перемещения задавалась одинаковой для всех блоков $D_c = 10^{-5}$ м. Длительность эпизодов скольжения участков разлома (блоков), на которых реализуется режим событий медленного скольжения, далее «медленные» блоки, регулировалась вариацией «параметра вязкости» $O = \eta_d \cdot S / d$ в уравнении (1).

Результаты расчета

Результаты проведенных расчетов показали, что энергия динамических срывов (землетрясений) напрямую зависит от плотности расположения участков, находящихся в режиме прерывистого скольжения - “asperities”. Анализ проводился на примере системы, содержащей 100 “asperities”. Общее количество блоков в системе зависит от плотности расположения “asperities”. Так, общее количество блоков в расчете системы, состоящей только из «asperities», составляло 100. При среднем промежутке $\Delta N = 40$ общее количество блоков в расчете составило 3859. В расчетах при сохранении некоторой заданной средней величины случайным образом варьировались плотность расположения «asperities» в системе (количество стабильных блоков ΔN между двумя соседними нестабильными блоками) и параметр $A = b - a$ «R & S» – модели.

Рассматривались расчетные зависимости кинетической энергии системы от времени $E_{kin}(t)$. Все локальные максимумы на эпюре кинетической энергии трактовались как сейсмические события. Энергия нормировалась на кинетическую энергию системы при движении всех блоков со скоростью протяжки E_{stab} . В качестве параметра, характеризующего плотность расположения «asperities», использовалось среднее расстояние ΔX_{cp} между двумя соседними «asperities», нормированное на размер блока L_b . На рис. 3 приведены примеры расчета рас-

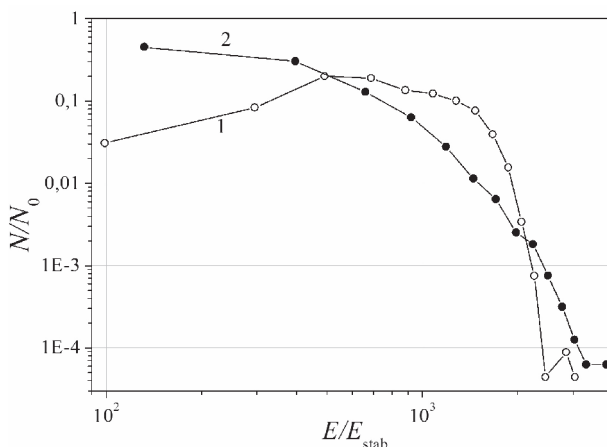


Рис. 3. Распределения событий по энергии для систем с фиксированным параметром Δ (1) и со случайной вариацией параметра Δ (2). Расчет с $\Delta X_{cp} = 27,9$, $\Delta_{cp} = 0,056$, $a = 0,004$

пределения количества событий ($P = N/N_0$) по энергии. На участке спада расчетные распределения $P(E)$ в целом соответствуют закону повторяемости Гутенберга–Рихтера, однако величина “b-value” заметно больше 1. Этот эффект может быть связан с особенностями численной модели. В частности, параметры используемой в расчетах «R&S» – модели одинаковы для всех нестабильных блоков системы. Для системы со случайной вариацией параметра Δ нестабильных блоков наблюдается монотонный спад зависимости $P(E)$ и тенденция уменьшения величины параметра b для событий с небольшой магнитудой. Последнее обычно приписывается несовершенству каталога, хотя некоторые современные модели динамики землетрясений уже изначально описывают данный эффект [Bhattacharya et al., 2009]. Увеличение величины случайного разброса среднего расстояния между «asperities» и вариаций параметра Δ приводит к «размыванию» пика зависимости $P(E)$ и увеличению максимальной зарегистрированной в расчете энергии срыва.

Зависимости от среднего расстояния между «asperities» максимальной зарегистрированной в расчете энергии срыва показаны на рис. 4. Представив расчетную зависимость в логарифмических координатах, можно видеть, что максимальная энергия срыва изменяется примерно обратно пропорционально квадрату среднего расстояния между нестабильными блоками.

Старт «сейсмогенного разрыва» в используемой модели всегда происходит на участке нестабильного скольжения, хотя динамическому срыву может предшествовать событие медленного скольжения на участке разлома, обладающем соответствующими фрикционными свойствами (отличное от нуля значение вязкости η_d в уравнении (1)), которое инициирует динамический срыв. Пример подобного эпизода приведен на рис. 5, где показан фрагмент эпюр скорости скольжения «медленного» блока (№ 100 ($a = 0,002$, $b = 0,06$, $Q = \eta_d \cdot S / d = 90$ кН·с/м)) с существенным вкладом вязкого члена в (1) и нестабильного блока № 102 ($a = 0,004$, $b = 0,08$).

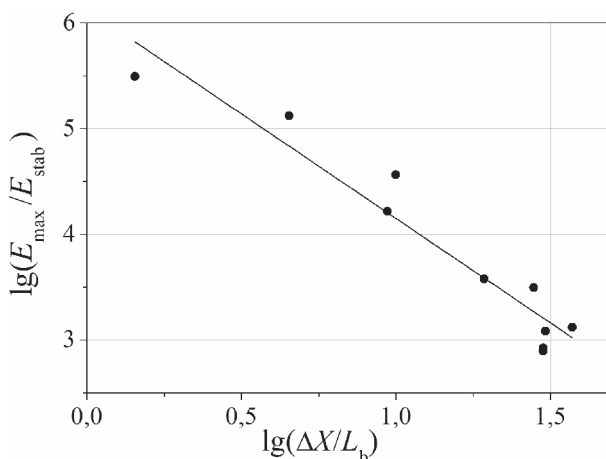


Рис. 4. Линейная аппроксимация в логарифмических координатах зависимости максимальной энергии срыва от среднего расстояния между «asperities» (маркеры – расчетные данные)

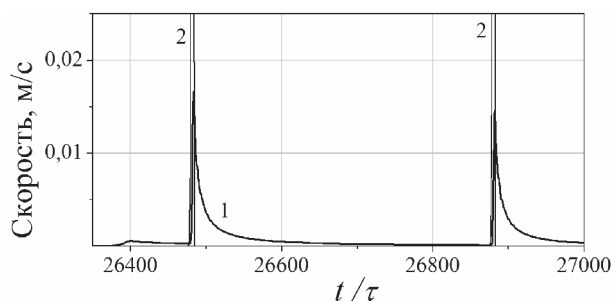


Рис. 5. Фрагмент эпюр скорости движения «медленного» блока № 100 (линия 1) и нестабильного блока № 102 (линия 2)

Расположенный между ними блок № 101 имеет характеристики, соответствующие стабильному трению ($a = 0,0015$, $b = 0,0009$). Динамическому срыву предшествует участок асейсмического скольжения «медленных» блоков ($t/\tau \sim 26380-26480$), вслед за которым следует инициированный медленным слипом скачок скорости, связанный со срывом нестабильного блока. Амплитуда этого скачка для «медленного» блока № 102 почти на порядок меньше максимальной скорости срыва нестабильного блока № 100 ($\sim 0,092$ м/с), а длительность существенно (почти на 2 порядка) больше. Важной особенностью процесса в использованной конфигурации системы является то обстоятельство, что длительное постдинамическое скольжение «медленных» блоков в свою очередь инициирует скорый повторный срыв нестабильного блока. Такие «дуплеты» с различным временем задержки иногда наблюдаются и в природе (Симуширские землетрясения 2006–2 007 гг. , землетрясения Izmit и Düzce 1999 г. на Северо-Анатолийском разломе и др.).

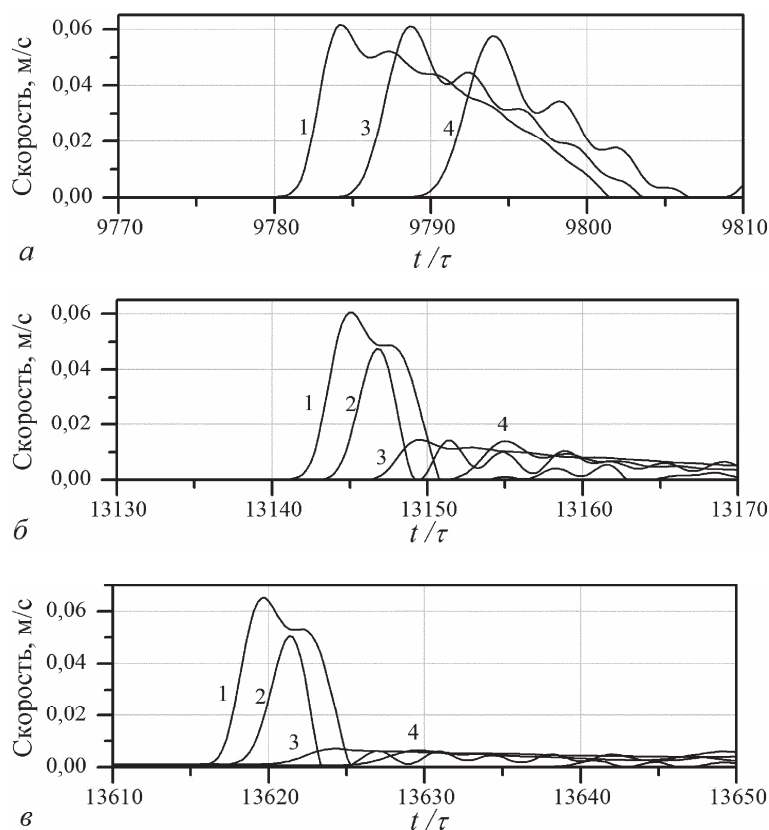


Рис. 6. Распространение импульса скорости от срыва первого (нестабильного) блока по цепочке из 20 блоков (1 – блок №1, 2 – блок № 3, 3 – блок № 5, 4 – блок № 10):
 а – система без «медленных» блоков; б – в системе один «медленный» блок (№ 5),
 $Q = 90 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$; в – в системе один «медленный» блок (№ 5), $Q = 200 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$

Поскольку «медленные» блоки в значительной степени способны демпфировать распространяющийся по цепочке импульс скорости от срыва “asperity”, инициирующий подвижку стабильных блоков, следует ожидать, что «медленные» блоки могут играть важную роль в процессе остановки разрыва. Иллюстрация этого эффекта приведена на рис. 6, где показаны результаты расчета движения системы из 20 блоков, в которой только первый блок является нестабильным. Распространение импульса скорости от срыва “asperity” в системе, содержащей лишь стабильные блоки, показано на рис. 6, а. В системе, содержащей хотя бы один «медленный» блок, амплитуда распространяющегося по цепочке импульса скорости снижается на порядок и более, в зависимости от величины эффективной вязкости (рис. 6, б, в). Если в варианте расчета, показанном на рис. 6, а, значимое перемещение испытали все 20 блоков, то в варианте с «медленным» блоком (рис. 6, в) амплитуда перемещения блоков $N \geq 5$ не велика. Иными словами, «длина разрыва» в варианте расчета на рис. 6, а, по крайней мере на порядок больше, чем на рис. 6, в.

Обсуждение и выводы

Предположение о том, что «asperities» – это участки разлома, не столько более прочные, по сравнению с остальными, сколько более «жесткие», дает основу для существенной эволюции представлений о развитии и остановке сейсмогенных разрывов. Как отмечалось выше, большая жесткость разлома или его фрагмента здесь понимается как более быстрое снижение трения на разломе в процессе скольжения. Зарождение динамического срыва (гипоцентр землетрясения) может произойти при выполнении условия скоростного разупрочнения, которое выполняется для участков с нестабильным и условно стабильным трением. При этом при использовании модели “R& S” необходимым является выполнение условия $K \leq (b - a) \cdot \sigma_n / D_c$, где K – жесткость нагружения (жесткость массива, вмещающего разлом). В простейшем виде $K = \xi \cdot G / L$, где G – модуль сдвига, $\xi \sim 1$ – коэффициент формы, а L – размер блока.

Судя по результатам выполненных расчетов, участками торможения разрыва оказываются условно стабильные блоки, для которых существенную роль играет псевдовязкая компонента сопротивления сдвигу. Как показывают результаты лабораторных экспериментов, на этих участках максимальное значение скорости снижения сопротивления сдвигу на запредельной ветви деформирования разлома (максимальная сдвиговая жесткость разлома) близка к значению жесткости массива.

В рамках предложенного в настоящей статье подхода, взаимное расположение и плотность участков разлома с разными фрикционными характеристиками определяет весь ход развития сейсмогенного разрыва – от зарождения до остановки, то есть землетрясение заранее может «знать» свою магнитуду. При этом, основным параметром, определяющим поведение разрыва на том или ином участке, является вышеупомянутая максимальная сдвиговая жесткость разлома на запредельном участке.

Если подобная ситуация имеет место в натуре, это создает предпосылки для дистанционной диагностики активных разломов сейсмическими методами. Одним из наиболее чувствительных методов для определения жесткости узких протяженных образований таких, как разломные зоны, – является метод диагностики, предложенный и апробированный в ИДГ РАН несколько лет назад [Костюченко и др., 2003]. Наилучшие результаты при использовании этого метода достигаются в тех случаях, когда измерения производятся на профиле, пересекающем разломную зону. Понятно, что в случае исследования областей, расположенных на глубине свыше нескольких километров, возникают значительные методические трудности. Кроме того, динамическая сдвиговая жесткость разлома, которая определяет закономерности отражения и преломления сейсмической волны, существенно отличается как от квазистатического значения, так и от жесткости на запредельном участке, хотя определенная корреляция между этими параметрами очевидно имеется. В этой связи, идея использования сейсмических методов для контроля напряженно-деформированного состояния разломной зоны требует дальнейшего развития.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694).

Литература

- Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Исследование режимов движения по разлому // Физика Земли. 2016. № 5. С. 13-24.
- Будков А.М., Кочарян Г.Г. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 3. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 3. С. 86-92.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре / Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
- Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. 2002. Т. 5. № 5. С. 23-42.
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Новиков В.А., Остапчук А.А. Медленные скольжения по разломам. Условия возникновения, перспективы исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 863-891.
- Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16, № 5. С. 5-15.
- Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18, № 4. С. 94-104.
- Barridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity // Bull. Seismol. Soc. Of America. 1967. Vol. 57. № 3. P. 341-371.
- Bhattacharya P., Chakrabarti B.K. et al. Fractal models of earthquake dynamics / Heinz Georg Schuster (ed.) // Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity. 2009. Vol. 2. P. 107-150. Wiley-VCH. ISBN 3-527-40850-9.
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. 1966. № 153. P. 990-992.
- Chinnery M.A. The strength of the earth's crust under horizontal shear stress // J. Geophys. Res. 1964. № 69. P. 2085-2089.
- Das S., Aki K. Fault plane with barriers: a versatile earthquake model // J. Geophys. Res. 1977. № 82, 36. P. 5658-5670.
- Deiterich J.H. Modeling of rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. № B5. P. 2161-2168.
- Iio Y. Earthquake Nucleation Process Extreme Environmental Events: Complexity in Forecasting and Early Warning / Ed. R.A. Meyers // Springer, 2010. P. 320-337.
- Kanamori H., Stewart G.S. Mode of strain release along Gibbs fracture zone, Mid-Atlantic ridge // Phys. Earth and Plan. Interiors. 1976. № 11(4). P. 312-332.
- Lapusta N., Rice J.R. Nucleation and early seismic propagation of small and large events in a crustal earthquake model // J. Geophys. Res. 2003. № 108. doi: 10.1029/2001JB000793.
- Reid H.F. The Mechanics of the Earthquake // The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission. Vol. 2. Carnegie Inst., Washington, D.C., 1910. P. 16-28.
- Spudich P., Cranswick E. Direct observation of rupture propagation during the 1979 Imperial Valley earthquake using a short-baseline accelerometer array // Bull. Seismol. Soc. Am. 1984. № 74. P. 2083-2114.
- Weng H., Huang J., Yang H. Barrier-induced supershear ruptures on a slip-weakening fault // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 4824-4832. doi:10.1002/2015GL064281.
- Shibazaki B., Matsu'ura M. Spontaneous processes for nucleation, dynamic propagation, and stop of earthquake rupture // Geophys. Res. Lett. 1992. Vol. 19. Is. 12. P. 1189-1119.
- Sibson R.H. Stopping of earthquake ruptures at dilational fault jogs // Nature. 1985. Vol. 316. P. 248-251, doi:10.1038/316248a0.
- Wesnowsky S.G. Predicting the endpoints of earthquake ruptures // Nature. 2006. Vol. 444. P. 358-360.