

МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДВИЖКИ В НЕОДНОРОДНОМ РАЗЛОМЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В.Г. Быков

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г.Хабаровск

Представлена математическая модель инициирования неустойчивого скольжения по разлому земной коры. На основе обобщенного уравнения slip – Гордона проведен анализ эффектов шероховатости и трения в разломе, а также амплитуды и частоты внешней периодической нагрузки на динамику разлома. Исследована относительная роль различных процессов в инициировании сейсмической подвижки.

Ключевые слова: неустойчивое скольжение, деформационные волны, инициирование подвижки, сейсмогенерирующий разлом, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоактивные разломы непрерывно подвергаются внешним инициирующим воздействиям переменного напряжения в результате земных приливов, деформационных волн от землетрясений или гидрологических факторов [3]. При этом в активном состоянии они могут генерировать колебания и влиять таким образом на другие разломы. Зарождение сейсмической подвижки может быть инициировано также неоднородностью физических свойств вдоль разломов при постоянной величине внешней нагрузки.

В предыдущей работе [1] было показано, что локальные деформационные эффекты на мезоуровне, связанные с понижением трения в контактах неоднородных бортов разломов, способны вызывать уединенные волны активизации, эволюция которых приводит к сейсмическим подвижкам в разломах.

Возмущения, действующие на уединенную волну активизации, могут быть двоякого рода. Прежде всего, это регулярные возмущения, например, внешние постоянные или переменные геофизические поля, дефекты структуры и т.п. Во-вторых, это случайные возмущения, обусловленные как флуктуациями внешних полей, так и параметров среды. Действие возмущения на отдельную уединенную волну может привести к изменению ее скорости и, соответственно, динамики сейсмогенерирующего разлома.

В ходе полевых экспериментов [5] по инициированию микросмещений в отдельных сегментах разломов было зафиксировано запаздывание реакции разрыва на воздействие вибрации, ударов и ма-

лых взрывов. Внешнее воздействие вызывало не “мгновенное” смещение в разрыве, как при землетрясениях, но плавное, а количество микроподвижек в разломе существенно увеличивалось. Эти выводы соответствуют более ранним лабораторным экспериментам по инициированию неустойчивой подвижки на контакте блоков горных пород [6-7]. Установлено, что дополнительная вибрация приводит к уменьшению промежутка времени между последовательными неустойчивыми подвижками [6], причем время задержки начала динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды колебаний инициирующего воздействия [7].

Разработанная в [1] математическая модель неустойчивого скольжения с трением по неоднородному разлому земной коры дает качественное и количественное согласие расчетов скорости деформационных волн, смещения и скорости подвижки с реальными величинами. Там же было показано, что профиль скорости смещения v на поверхности разлома имеет форму солитона, распространяющегося вдоль разлома со скоростью V_α . Если значение V_α мало, то v - незначительно и фиксируется устойчивое криповое движение без заметного ослабления контакта. Относительно большие скорости V_α в 1-10 м/с приводят к v порядка 0,1-1 м/с и резкому увеличению смещения u до 0,2-2 м, что соответствует сейсмической подвижке.

Поскольку изменение режима скольжения связано с резким увеличением скорости V_α , то необходимо установить, какие параметры и факторы оказывают наибольшее влияние на эволюцию скорости волны активизации и инициирование сейсмической подвижки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕГО РАЗЛОМА

Теоретическое исследование эффектов периодически изменяющегося трения в разломе и инициирования неустойчивой подвижки проводилось на основе модели [1], дополненной функцией $\sigma(\eta)$, отражающей внешнее воздействие на контакт бортов разлома. Модифицированное таким образом обобщенное уравнение sin-Гордона [1], примет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} = \sin U + \alpha \frac{\partial U}{\partial \eta} + \gamma(\xi) \delta(\xi - L) \sin U + \sigma(\eta), \quad (1)$$

$$U = 2\pi \frac{u}{a}, \xi = \frac{\pi x}{ap}, \eta = \frac{\pi \omega_0 t}{p}, p^2 = \frac{a^2 D_t}{4mgh}, \omega_0^2 = \frac{D_t}{m},$$

$$\alpha \approx \frac{a\mu}{d\Delta\rho_s (gh)^{1/2}}, \gamma = \frac{H}{L}.$$

Здесь u - смещение блоков (зерен), периодически расположенных по длине разлома; a - расстояние между центрами блоков; D_t - тангенциальная контактная жесткость; m - масса блока; h - расстояние между соседними слоями блоков; g - ускорение силы тяжести; μ - вязкость прослойки между блоками; d - диаметр кругового контакта блоков; Δ - толщина прослойки; ρ_s - плотность материала блока; α, γ - параметры трения и неоднородности; H, L - высота шероховатостей и расстояние между ними, нормированные на ap/π ; $\delta(\xi)$ - дельта-функция Дирака.

В правой части обобщенного уравнения sin-Гордона (1) первое слагаемое характеризует восстанавливающую силу, возникающую при сдвиге вдоль синусоидально-однородных поверхностей разрыва; второе - силу трения, пропорциональную скорости относительного смещения; третье - соответствует поправкам на неоднородности, распределенные на расстоянии apL/π ; четвертое - описывает внешнее инициирующее воздействие на разлом.

Интегрирование уравнения (1) осуществлялось приближенным методом Мак-Лафлина - Скотта [2], а численная реализация проводилась по схеме Рунге-Кутты-Фельберга [8]. Задавались параметры среды: $\rho_s = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $D_t = 10^5$ Н/м, $g = 9,8$ м/с², $r = 0.1 - 1.0$ м, $a = h = 2r$. Расчеты проводились при варьировании параметров трения α и неоднородности γ , характеризующих состояние контакта в разломе, а также величины $\sigma(\eta)$, определяющей внешнюю нагрузку.

Режим скольжения по разрыву в представленной модели зависит от величины скорости V_α волны активизации и соответственно - скорости подвижки v , поэтому в дальнейшем для анализа расчетов будем использовать именно эти характеристики.

ЭФФЕКТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕНИЯ ВНУТРИ РАЗЛОМА

Эволюция скорости V_α волны активизации разлома при дополнении параметра трения α некоторой периодически изменяющейся составляющей α_1 соответствует режиму циклического внесения возмущения в некоторые сегменты разлома. Тогда параметр α в уравнении (1) переходит в $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\eta/\tau)$, где α_0, α_1, τ - некоторые постоянные.

Результаты расчетов по (1) при $\sigma(\eta) = 0, \tau = 10^2$ и вариации $\alpha_0, \alpha_1, \gamma$ показывают (рис. 1, 2), что максимум скорости V_α достигается при $t = 2-8$ с от момента возмущения, а промежуток времени, в течение которого V_α соответствует подвижке - 1-5 с. В реальных разломах при сильных землетрясениях время скольжения, действительно, составляет величину порядка секунд [9].

При постоянном параметре неоднородности $\gamma = 0.9$ максимальное значение V_α фиксируется в один и тот же момент времени, но кривые 1, 2, 3 различаются по амплитуде: наибольшему параметру трения α_0 соответствует минимальное значение V_α (рис. 1). Кривые 3 и 4, рассчитанные при различных γ и равных α_0, α_1 , в момент $t = 30$ с сливаются и далее становятся неразличимыми. Из рис. 1 также следует, что

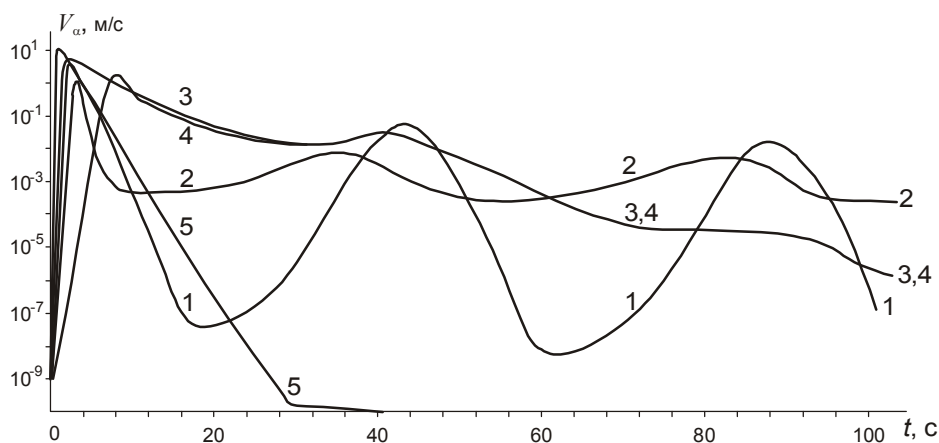


Рис.1. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.09, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.9$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.1$;
- 5 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0, \gamma = 0.9$

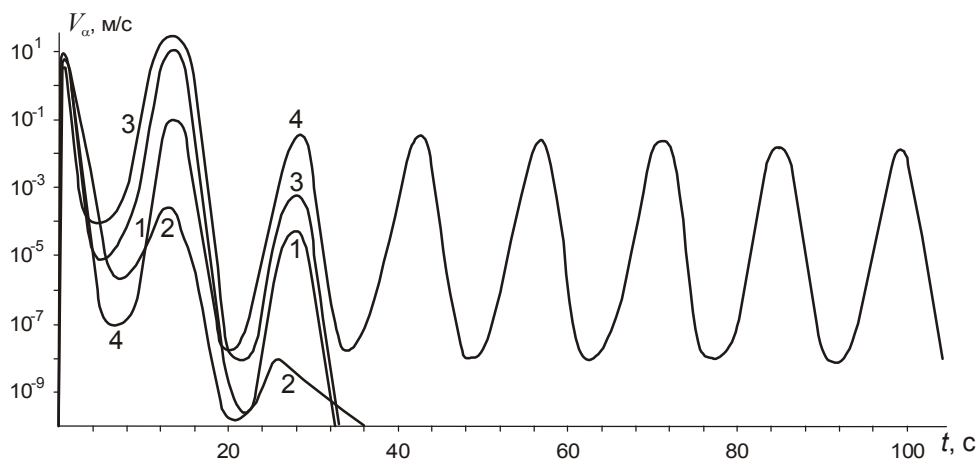


Рис. 2. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 0.1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.6$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.05, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.45$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$.

при увеличении γ максимальное значение V_α наступает намного раньше. При малых α_0 и α_1 (кривые 3 и 4) скорость V_α постепенно затухает до нуля. Более высокие значения α_0 и α_1 (кривые 1 и 2) выводят V_α на периодический режим со скоростями, близкими к скоростям быстрых деформационных волн в 1-10 км/сутки [10]. Эволюция V_α без периодически изменяющегося дополнительного трения ($\alpha_1=0$) представлена кривой 5. Этот вариант расчета соответствует единичному акту генерирования уединенной волны с переходом системы в режим “разлом заперт”.

Рис. 2 показывает, что только при определенном состоянии контакта бортов разлома, т.е. сочетании параметров трения и неоднородности, возможно периодическое генерирование волн активизации со скоростями, соизмеримыми со скоростями деформационных волн (кривая 4). В остальных случаях (кривые 1, 2 и 3) V_α относительно быстро спадает до нуля. Отличительной особенностью является то, что при более мелких неоднородностях ($r = 0.1$ м) второй максимум скорости V_α (кривые 1 и 3) превосходит по величине первый максимум.

Увеличение амплитуды α_1 периодической составляющей трения при неизменных прочих параметрах модели приводит к понижению максимального значения скорости v подвижки в разломе (рис. 3). Увеличение параметра неоднородности γ , характеризующего “зацепление” бортов разлома, наоборот, вызывает рост амплитуды скорости v_{max} подвижки.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОДВИЖКИ ВНЕШНИМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Внешнее иницирующее воздействие на разлом будем моделировать включением в уравнение (1) безразмерной периодической функции $\sigma(\eta) = \sigma_0 \sin(\Omega\eta)$, где σ_0, Ω - безразмерные амплитуда и частота внешней нагрузки, при постоянном параметре трения α . Неустойчивая подвижка без внешнего воздействия, следуя [6], в дальнейшем называется естественной подвижкой, а подвижка, возникаю-

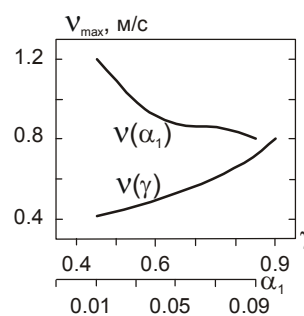


Рис. 3. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от величины периодически изменяющейся компоненты трения α_1 ($\alpha_0 = 0.02, \gamma = 0.9$) и параметра неоднородности γ ($\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09$).

щая при дополнительной внешней периодической нагрузке, - иницированной.

Профиль скорости V_α уединенной волны (кривые 2 и 3) по разрыву резко отличается от профиля скорости в случае естественной подвижки (кривая 1) (рис. 4,а). Если форма начальной части кривых V_α во всех случаях совпадает, то после достижения максимума она имеет существенные различия. На более высоких частотах (кривая 3) V_α представляет собой периодическую кривую, модулируемую ниспадающей частью кривой V_α , рассчитанной при отсутствии источника внешнего воздействия (кривая 1). Об этом же свидетельствует и рис. 5, на котором более детально показаны эффекты высокочастотного внешнего воздействия разной амплитуды. Низкочастотный ($\Omega=0.1$) внешний источник вызывает более плавные изменения V_α , причем внутреннее трение в разломе уже не может полностью скомпенсировать влияние внешнего источника (рис. 4,а).

Из рис. 4,б следует, что первая иницированная подвижка на любой частоте внешнего воздействия наступает всегда раньше, чем естественная подвижка (кривая 1). В этом варианте расчетов временной интервал ΔT между V_{cmax} и v_{max} при естественной подвижке (кривая 1) больше, чем при инициро-

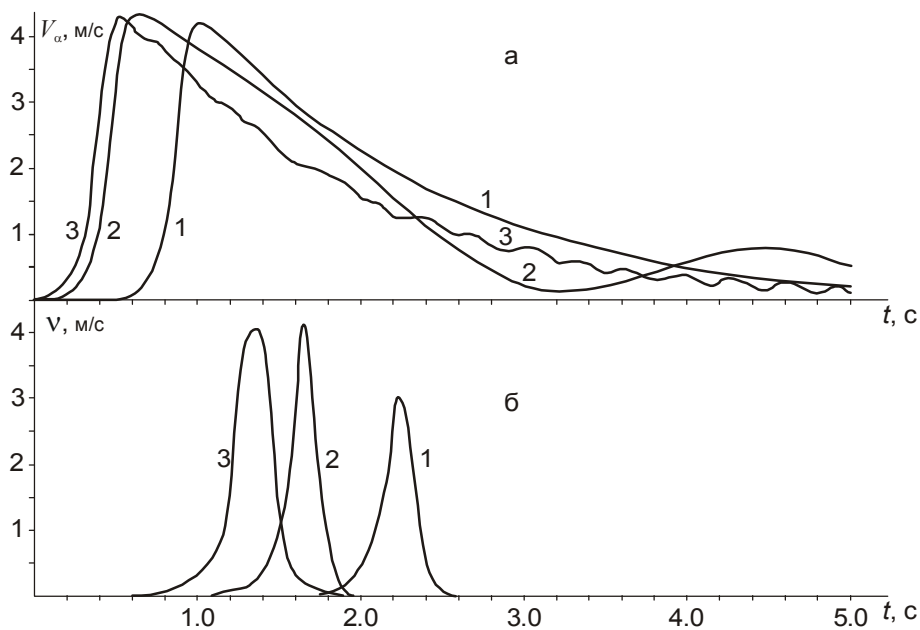


Рис. 4. Эволюция скорости волны активизации V_{α} (а) и скорости подвижки v (б) при естественной (1) и инициированной (2, 3) подвижках.

1 - $\sigma_0 = 0$, $\Omega = 0$;
 2 - $\sigma_0 = 0,01$, $\Omega = 0,1$;
 3 - $\sigma_0 = 0,01$, $\Omega = 1,0$.
 Параметры $\alpha = 0,04$, $\gamma = 0,9$.

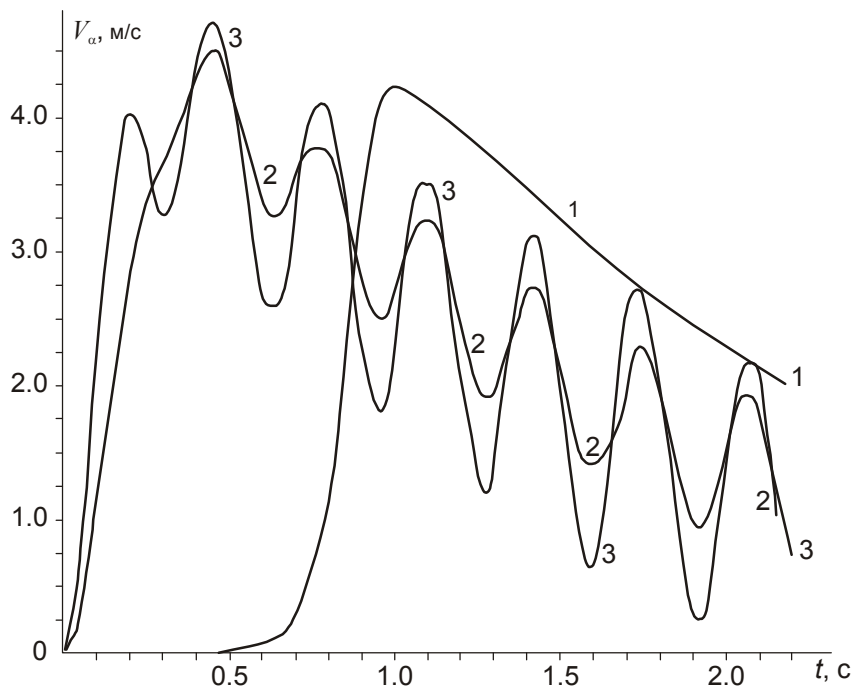


Рис. 5. Эволюция скорости V_{α} волны активизации при различных параметрах внешнего воздействия.

1 - $\sigma_0 = 0$, $\Omega = 0$;
 2 - $\sigma_0 = 0,1$, $\Omega = 1,0$;
 3 - $\sigma_0 = 0,2$, $\Omega = 1,0$.
 Параметры $\alpha = 0,04$, $\gamma = 0,9$.

ванной подвижке (кривые 2, 3). При увеличении частоты воздействия нагрузки этот интервал возрастает. Максимальные значения скорости волны активизации V_{α} , как и скорости подвижки v_{max} , соответствуют минимальной частоте внешней синусоидальной нагрузки ($\Omega = 0,1$).

Время задержки инициированной динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды внешнего воздействия (рис. 6), что находится в хорошем согласии с лабораторными [7] и полевыми [5] экспериментами. Вместо одного проскальзывания возникает несколько подвижек, причем амплитуда

скорости первой подвижки максимальна. Амплитуды скорости подвижек и временные интервалы между ними не равны. Максимумы скоростей почти всех подвижек совпадают по величине. Скорости подвижек слабо зависят от амплитуды σ_0 внешнего воздействия (рис. 6-7). Количество подвижек пропорционально амплитуде нагрузки.

С увеличением частоты постоянной синусоидальной нагрузки количество подвижек растет, а промежуток времени между последовательными подвижками уменьшается (рис. 6), что также совпадает с экспериментами [5-6]. Уменьшение частоты

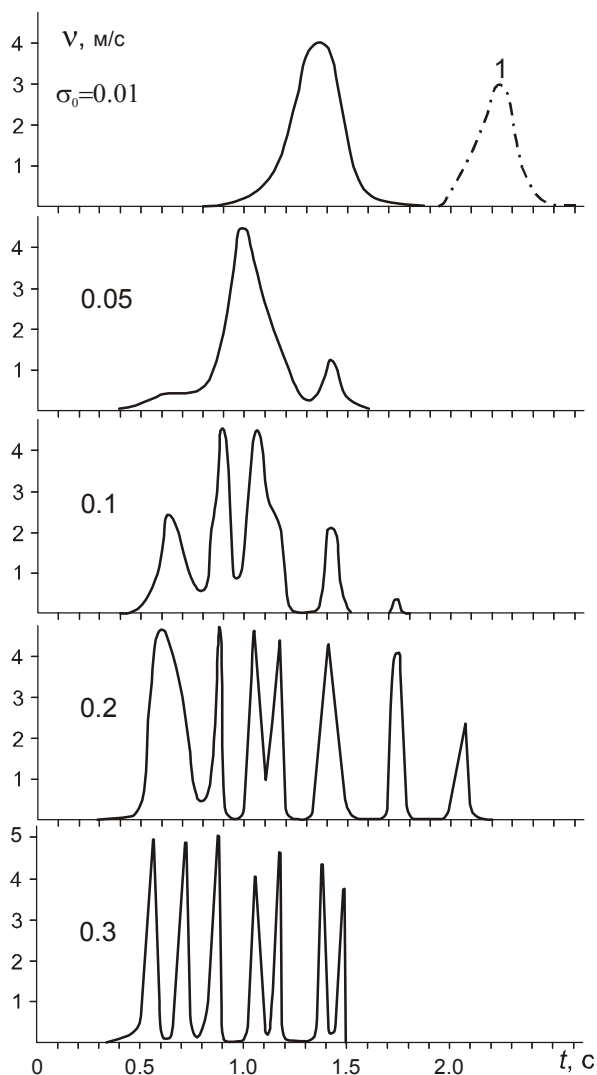


Рис. 6. Изменение скорости инициированной подвижки v при постоянной частоте внешнего воздействия $\Omega = 1,0$ и различной амплитуде нагрузки σ_0 .

1 - профиль скорости естественной подвижки. Параметры $\alpha = 0.04$, $\gamma = 0.9$.

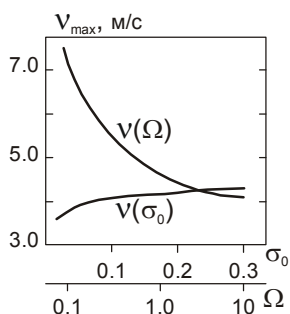


Рис. 7. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от частоты Ω ($\sigma_0 = 0.1$) и амплитуды σ_0 ($\Omega = 10$) внешней нагрузки. Параметры $\alpha = 0.04$, $\gamma = 0.9$.

внешнего воздействия Ω приводит к существенному росту амплитуды скорости подвижки. Даже незначительная по амплитуде σ_0 внешняя нагрузка может вызвать сейсмическую подвижку (рис. 7). Особенно, если учесть, что на завершающей стадии подготовки землетрясения процесс становится чрезвычайно чувствительным к внешним воздействиям [4].

Таким образом, внешнее воздействие на разлом можно рассматривать как усиление волны активизации волнами накачки или деформационными волнами различной частоты, излучаемыми при ударе, взрыве или землетрясении.

Из расчетов характеристик подвижек при различных физико-механических параметрах разлома следует, что интенсивность и амплитуда скорости инициированной подвижки зависят от состояния контакта бортов разлома.

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования эффектов циклически изменяющегося трения внутри разлома и периодического внешнего воздействия на процесс развития неустойчивого скольжения по неровному разрыву показали:

1. Обобщенное уравнение sin-Гордона с учетом трения, неоднородности и периодического внешнего источника описывает основные черты деформационного процесса при инициировании подвижек по неоднородному разлому. Подбор соответствующих параметров в уравнении (1) дает возможность применять это уравнение при моделировании сейсмического процесса.
2. Внешнее периодическое воздействие является эффективным механизмом инициирования неустойчивой динамической подвижки.
3. Внешнее высокочастотное воздействие может инициировать активизацию разлома, но не обеспечивает периодическое генерирование деформационных волн и проявление сейсмических подвижек, как в случае циклически изменяющегося трения внутри разлома.
4. Основное влияние на интенсивность инициирования разлома, т.е. на амплитуду скорости подвижек v_{max} и временной интервал между ними, оказывает именно частота внешней нагрузки.
5. Увеличение амплитуды внешней синусоидальной нагрузки приводит к сокращению времени задержки инициированной сейсмической подвижки.
6. Процесс инициирования неустойчивой подвижки по разлому и особенности его протекания зависят от состояния контакта бортов разлома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 1. С.104-108.
2. Мак-Лафлин Д., Скотт Э. Многосолиitonная теория возмущений // Солитоны в действии / Под ред. К.Лонгрена, Э.Скотта. М.: Мир, 1981. С.210-268.
3. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 140 с.
4. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности и управляемой разрядки тектонических напряжений // Науч. конф. «Современная сейсмология: Достижения и Проблемы», 7-9 октября, 1998 г., Москва. М., 1998. С.12.
5. Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. 1999. Т.40, № 3. С.360-372.
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С.72-78.
7. Соболев Г.А., Кольцов А.В., Андреев В.О. Триггерный эффект колебаний в модели землетрясения // Докл. АН СССР. 1991. Т.319, № 2. С.337-341.
8. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 279 с.
9. Carlson J.M. Time intervals between characteristic earthquakes and correlations with smaller events: An analysis based on a mechanical model of a fault // J. Geophys. Res. 1991. V.96, N B3. P.4255-4267.
10. Nikolaevskiy V.N. Tectonic stress migration as nonlinear wave process along earth crust faults // Proceed. of 4th Inter. Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu, Japan, 28 Sept.- 2 Oct. 1997/ Eds.: T.Adachi, F.Oka and A.Yashima. Rotterdam: A.A.Balkema, 1998. P.137-142.

Поступила в редакцию 27 января 2000 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

Model of seismic slip initiation in the inhomogeneous crustal fault

V. G. Bykov

A mathematical model of initiation of stick-slip along the crustal fault is presented. On the basis of generalized sine-Gordon equation, analysis is made of asperity and friction effects in the fault and also the amplitude and frequency of periodic load on fault dynamics. A relative role of different processes in the initiation of seismic slip is investigated.

МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДВИЖКИ В НЕОДНОРОДНОМ РАЗЛОМЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В.Г. Быков

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г.Хабаровск

Представлена математическая модель инициирования неустойчивого скольжения по разлому земной коры. На основе обобщенного уравнения slip – Гордона проведен анализ эффектов шероховатости и трения в разломе, а также амплитуды и частоты внешней периодической нагрузки на динамику разлома. Исследована относительная роль различных процессов в инициировании сейсмической подвижки.

Ключевые слова: неустойчивое скольжение, деформационные волны, инициирование подвижки, сейсмогенерирующий разлом, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоактивные разломы непрерывно подвергаются внешним инициирующим воздействиям переменного напряжения в результате земных приливов, деформационных волн от землетрясений или гидрологических факторов [3]. При этом в активном состоянии они могут генерировать колебания и влиять таким образом на другие разломы. Зарождение сейсмической подвижки может быть инициировано также неоднородностью физических свойств вдоль разломов при постоянной величине внешней нагрузки.

В предыдущей работе [1] было показано, что локальные деформационные эффекты на мезоуровне, связанные с понижением трения в контактах неоднородных бортов разломов, способны вызывать уединенные волны активизации, эволюция которых приводит к сейсмическим подвижкам в разломах.

Возмущения, действующие на уединенную волну активизации, могут быть двоякого рода. Прежде всего, это регулярные возмущения, например, внешние постоянные или переменные геофизические поля, дефекты структуры и т.п. Во-вторых, это случайные возмущения, обусловленные как флуктуациями внешних полей, так и параметров среды. Действие возмущения на отдельную уединенную волну может привести к изменению ее скорости и, соответственно, динамики сейсмогенерирующего разлома.

В ходе полевых экспериментов [5] по инициированию микросмещений в отдельных сегментах разломов было зафиксировано запаздывание реакции разрыва на воздействие вибрации, ударов и ма-

лых взрывов. Внешнее воздействие вызывало не “мгновенное” смещение в разрыве, как при землетрясениях, но плавное, а количество микроподвижек в разломе существенно увеличивалось. Эти выводы соответствуют более ранним лабораторным экспериментам по инициированию неустойчивой подвижки на контакте блоков горных пород [6-7]. Установлено, что дополнительная вибрация приводит к уменьшению промежутка времени между последовательными неустойчивыми подвижками [6], причем время задержки начала динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды колебаний инициирующего воздействия [7].

Разработанная в [1] математическая модель неустойчивого скольжения с трением по неоднородному разлому земной коры дает качественное и количественное согласие расчетов скорости деформационных волн, смещения и скорости подвижки с реальными величинами. Там же было показано, что профиль скорости смещения v на поверхности разлома имеет форму солитона, распространяющегося вдоль разлома со скоростью V_α . Если значение V_α мало, то v - незначительно и фиксируется устойчивое криповое движение без заметного ослабления контакта. Относительно большие скорости V_α в 1-10 м/с приводят к v порядка 0,1-1 м/с и резкому увеличению смещения u до 0,2-2 м, что соответствует сейсмической подвижке.

Поскольку изменение режима скольжения связано с резким увеличением скорости V_α , то необходимо установить, какие параметры и факторы оказывают наибольшее влияние на эволюцию скорости волны активизации и инициирование сейсмической подвижки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕГО РАЗЛОМА

Теоретическое исследование эффектов периодически изменяющегося трения в разломе и инициирования неустойчивой подвижки проводилось на основе модели [1], дополненной функцией $\sigma(\eta)$, отражающей внешнее воздействие на контакт бортов разлома. Модифицированное таким образом обобщенное уравнение sin-Гордона [1], примет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} = \sin U + \alpha \frac{\partial U}{\partial \eta} + \gamma(\xi) \delta(\xi - L) \sin U + \sigma(\eta), \quad (1)$$

$$U = 2\pi \frac{u}{a}, \xi = \frac{\pi x}{ap}, \eta = \frac{\pi \omega_0 t}{p}, p^2 = \frac{a^2 D_t}{4mgh}, \omega_0^2 = \frac{D_t}{m},$$

$$\alpha \approx \frac{a\mu}{d\Delta\rho_s (gh)^{1/2}}, \gamma = \frac{H}{L}.$$

Здесь u - смещение блоков (зерен), периодически расположенных по длине разлома; a - расстояние между центрами блоков; D_t - тангенциальная контактная жесткость; m - масса блока; h - расстояние между соседними слоями блоков; g - ускорение силы тяжести; μ - вязкость прослойки между блоками; d - диаметр кругового контакта блоков; Δ - толщина прослойки; ρ_s - плотность материала блока; α, γ - параметры трения и неоднородности; H, L - высота шероховатостей и расстояние между ними, нормированные на ap/π ; $\delta(\xi)$ - дельта-функция Дирака.

В правой части обобщенного уравнения sin-Гордона (1) первое слагаемое характеризует восстанавливающую силу, возникающую при сдвиге вдоль синусоидально-однородных поверхностей разрыва; второе - силу трения, пропорциональную скорости относительного смещения; третье - соответствует поправкам на неоднородности, распределенные на расстоянии apL/π ; четвертое - описывает внешнее инициирующее воздействие на разлом.

Интегрирование уравнения (1) осуществлялось приближенным методом Мак-Лафлина - Скотта [2], а численная реализация проводилась по схеме Рунге-Кутты-Фельберга [8]. Задавались параметры среды: $\rho_s = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $D_t = 10^5$ Н/м, $g = 9,8$ м/с², $r = 0.1 - 1.0$ м, $a = h = 2r$. Расчеты проводились при варьировании параметров трения α и неоднородности γ , характеризующих состояние контакта в разломе, а также величины $\sigma(\eta)$, определяющей внешнюю нагрузку.

Режим скольжения по разрыву в представленной модели зависит от величины скорости V_α волны активизации и соответственно - скорости подвижки v , поэтому в дальнейшем для анализа расчетов будем использовать именно эти характеристики.

ЭФФЕКТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕНИЯ ВНУТРИ РАЗЛОМА

Эволюция скорости V_α волны активизации разлома при дополнении параметра трения α некоторой периодически изменяющейся составляющей α_1 соответствует режиму циклического внесения возмущения в некоторые сегменты разлома. Тогда параметр α в уравнении (1) переходит в $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\eta/\tau)$, где α_0, α_1, τ - некоторые постоянные.

Результаты расчетов по (1) при $\sigma(\eta) = 0, \tau = 10^2$ и вариации $\alpha_0, \alpha_1, \gamma$ показывают (рис. 1, 2), что максимум скорости V_α достигается при $t = 2-8$ с от момента возмущения, а промежуток времени, в течение которого V_α соответствует подвижке - 1-5 с. В реальных разломах при сильных землетрясениях время скольжения, действительно, составляет величину порядка секунд [9].

При постоянном параметре неоднородности $\gamma = 0.9$ максимальное значение V_α фиксируется в один и тот же момент времени, но кривые 1, 2, 3 различаются по амплитуде: наибольшему параметру трения α_0 соответствует минимальное значение V_α (рис. 1). Кривые 3 и 4, рассчитанные при различных γ и равных α_0, α_1 , в момент $t = 30$ с сливаются и далее становятся неразличимыми. Из рис. 1 также следует, что

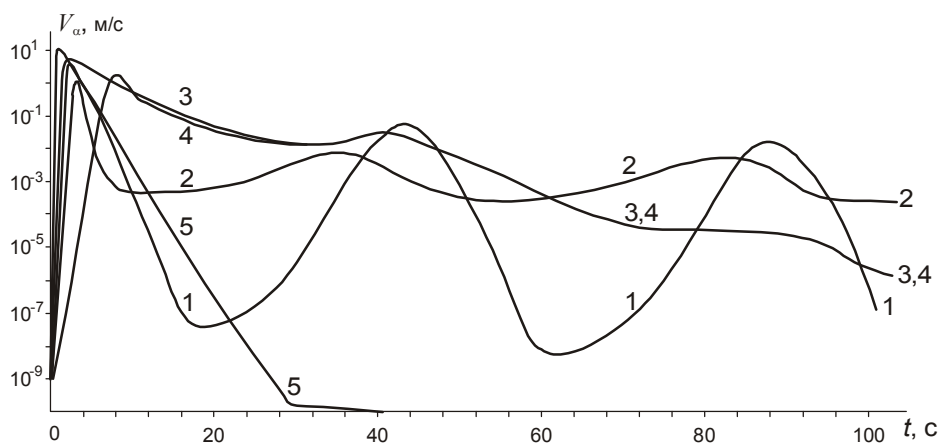


Рис.1. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.09, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.9$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.1$;
- 5 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0, \gamma = 0.9$

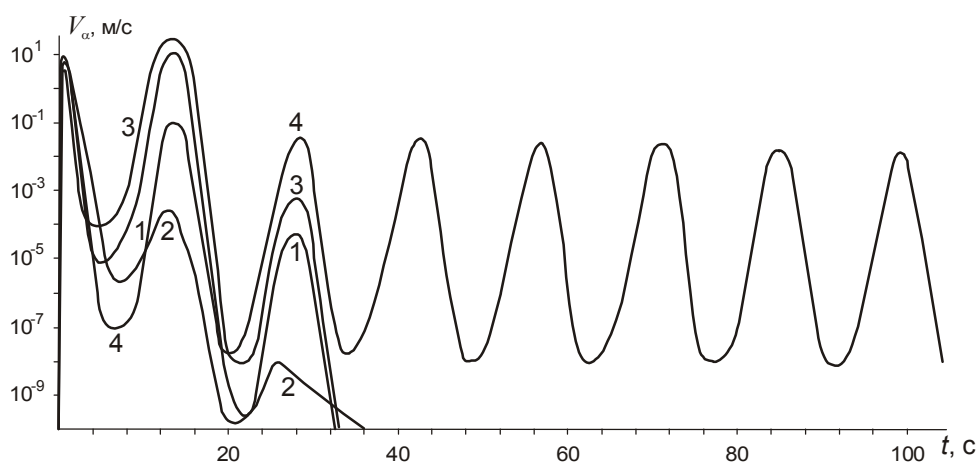


Рис. 2. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 0.1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.6$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.05, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.45$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$.

при увеличении γ максимальное значение V_α наступает намного раньше. При малых α_0 и α_1 (кривые 3 и 4) скорость V_α постепенно затухает до нуля. Более высокие значения α_0 и α_1 (кривые 1 и 2) выводят V_α на периодический режим со скоростями, близкими к скоростям быстрых деформационных волн в 1-10 км/сутки [10]. Эволюция V_α без периодически изменяющегося дополнительного трения ($\alpha_1=0$) представлена кривой 5. Этот вариант расчета соответствует единичному акту генерирования уединенной волны с переходом системы в режим “разлом заперт”.

Рис. 2 показывает, что только при определенном состоянии контакта бортов разлома, т.е. сочетании параметров трения и неоднородности, возможно периодическое генерирование волн активизации со скоростями, соизмеримыми со скоростями деформационных волн (кривая 4). В остальных случаях (кривые 1, 2 и 3) V_α относительно быстро спадает до нуля. Отличительной особенностью является то, что при более мелких неоднородностях ($r = 0.1$ м) второй максимум скорости V_α (кривые 1 и 3) превосходит по величине первый максимум.

Увеличение амплитуды α_1 периодической составляющей трения при неизменных прочих параметрах модели приводит к понижению максимального значения скорости v подвижки в разломе (рис. 3). Увеличение параметра неоднородности γ , характеризующего “зацепление” бортов разлома, наоборот, вызывает рост амплитуды скорости v_{max} подвижки.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОДВИЖКИ ВНЕШНИМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Внешнее иницирующее воздействие на разлом будем моделировать включением в уравнение (1) безразмерной периодической функции $\sigma(\eta) = \sigma_0 \sin(\Omega\eta)$, где σ_0, Ω - безразмерные амплитуда и частота внешней нагрузки, при постоянном параметре трения α . Неустойчивая подвижка без внешнего воздействия, следуя [6], в дальнейшем называется естественной подвижкой, а подвижка, возникаю-

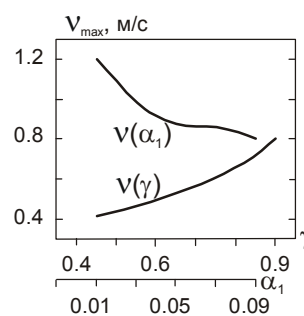


Рис. 3. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от величины периодически изменяющейся компоненты трения α_1 ($\alpha_0 = 0.02, \gamma = 0.9$) и параметра неоднородности γ ($\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09$).

щая при дополнительной внешней периодической нагрузке, - иницированной.

Профиль скорости V_α уединенной волны (кривые 2 и 3) по разрыву резко отличается от профиля скорости в случае естественной подвижки (кривая 1) (рис. 4,а). Если форма начальной части кривых V_α во всех случаях совпадает, то после достижения максимума она имеет существенные различия. На более высоких частотах (кривая 3) V_α представляет собой периодическую кривую, модулируемую ниспадающей частью кривой V_α , рассчитанной при отсутствии источника внешнего воздействия (кривая 1). Об этом же свидетельствует и рис. 5, на котором более детально показаны эффекты высокочастотного внешнего воздействия разной амплитуды. Низкочастотный ($\Omega=0.1$) внешний источник вызывает более плавные изменения V_α , причем внутреннее трение в разломе уже не может полностью скомпенсировать влияние внешнего источника (рис. 4,а).

Из рис. 4,б следует, что первая иницированная подвижка на любой частоте внешнего воздействия наступает всегда раньше, чем естественная подвижка (кривая 1). В этом варианте расчетов временной интервал ΔT между V_{cmax} и v_{max} при естественной подвижке (кривая 1) больше, чем при инициро-

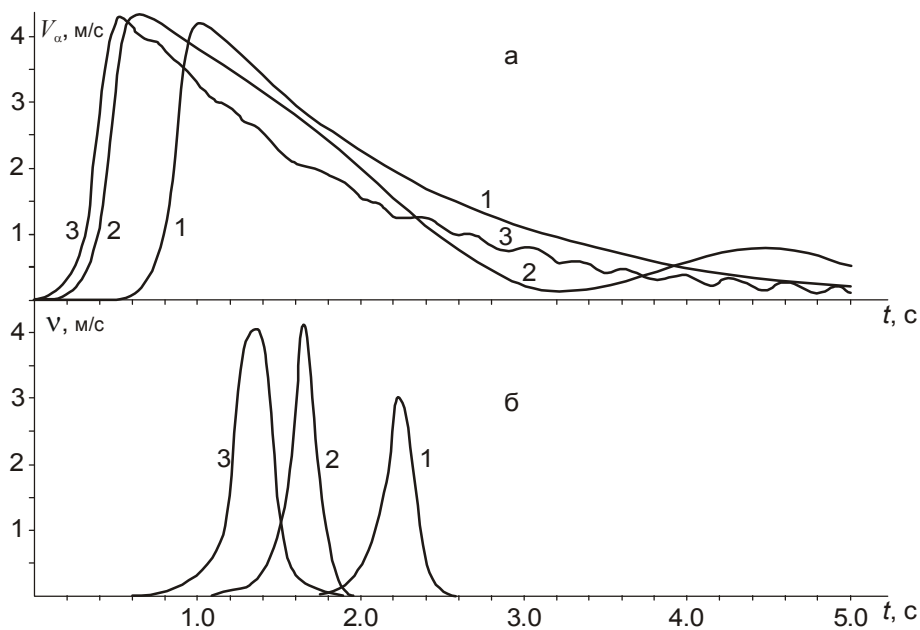


Рис. 4. Эволюция скорости волны активизации V_{α} (а) и скорости подвижки v (б) при естественной (1) и инициированной (2, 3) подвижках.

1 - $\sigma_0 = 0, \Omega = 0$;
 2 - $\sigma_0 = 0,01, \Omega = 0,1$;
 3 - $\sigma_0 = 0,01, \Omega = 1,0$.
 Параметры $\alpha = 0,04, \gamma = 0,9$.

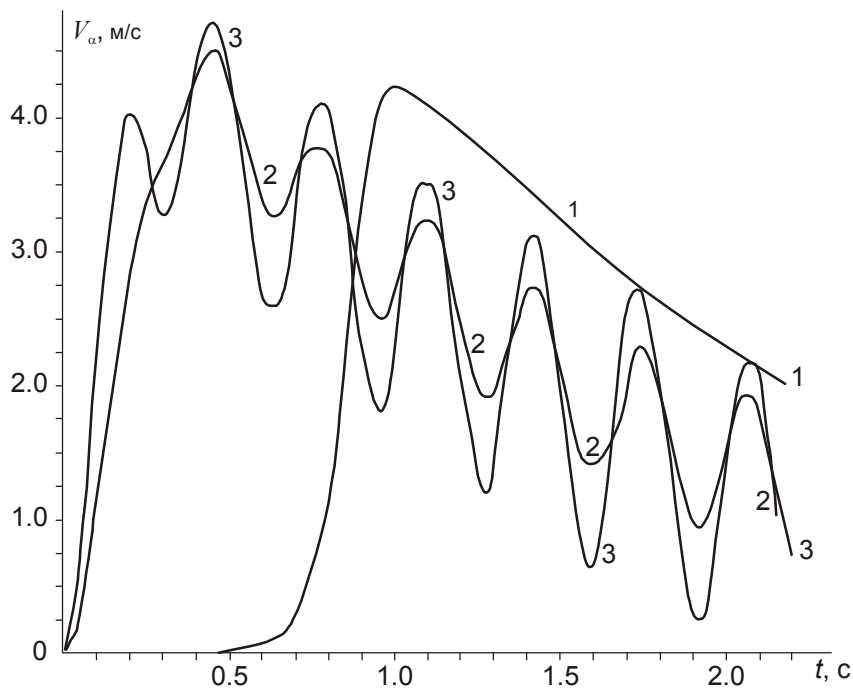


Рис. 5. Эволюция скорости V_{α} волны активизации при различных параметрах внешнего воздействия.

1 - $\sigma_0 = 0, \Omega = 0$;
 2 - $\sigma_0 = 0,1, \Omega = 1,0$;
 3 - $\sigma_0 = 0,2, \Omega = 1,0$.
 Параметры $\alpha = 0,04, \gamma = 0,9$.

ванной подвижке (кривые 2, 3). При увеличении частоты воздействия нагрузки этот интервал возрастает. Максимальные значения скорости волны активизации V_{α} , как и скорости подвижки v_{max} , соответствуют минимальной частоте внешней синусоидальной нагрузки ($\Omega = 0,1$).

Время задержки инициированной динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды внешнего воздействия (рис. 6), что находится в хорошем согласии с лабораторными [7] и полевыми [5] экспериментами. Вместо одного проскальзывания возникает несколько подвижек, причем амплитуда

скорости первой подвижки максимальна. Амплитуды скорости подвижек и временные интервалы между ними не равны. Максимумы скоростей почти всех подвижек совпадают по величине. Скорости подвижек слабо зависят от амплитуды σ_0 внешнего воздействия (рис. 6-7). Количество подвижек пропорционально амплитуде нагрузки.

С увеличением частоты постоянной синусоидальной нагрузки количество подвижек растет, а промежуток времени между последовательными подвижками уменьшается (рис. 6), что также совпадает с экспериментами [5-6]. Уменьшение частоты

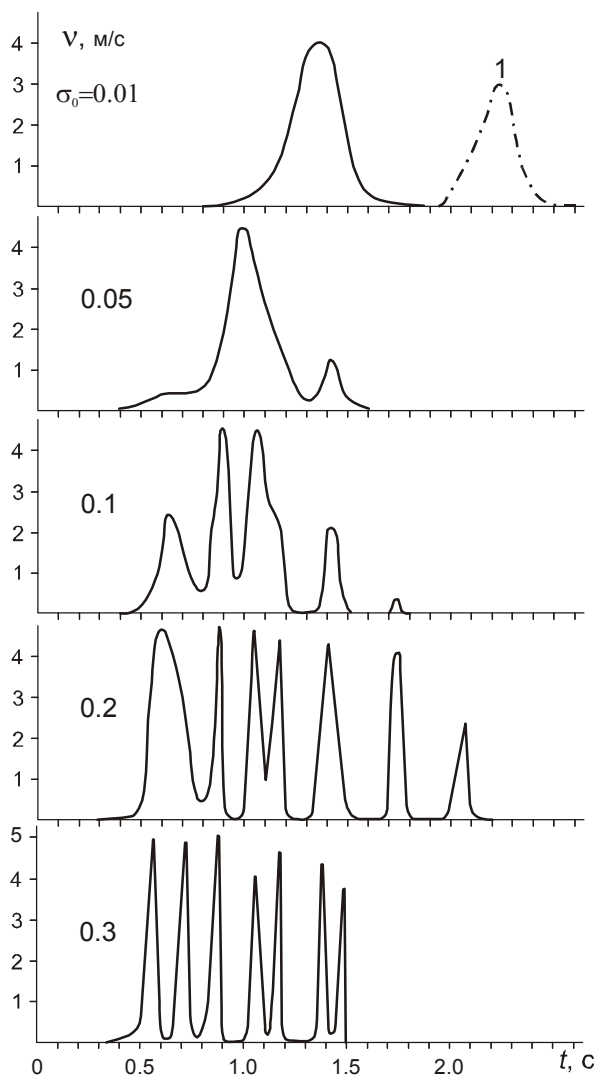


Рис. 6. Изменение скорости инициированной подвижки v при постоянной частоте внешнего воздействия $\Omega = 1,0$ и различной амплитуде нагрузки σ_0 .

1 - профиль скорости естественной подвижки. Параметры $\alpha = 0.04$, $\gamma = 0.9$.

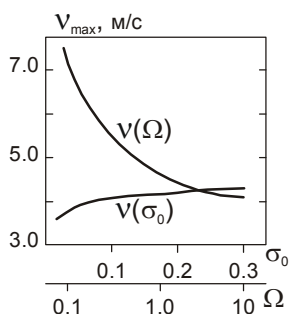


Рис. 7. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от частоты Ω ($\sigma_0 = 0.1$) и амплитуды σ_0 ($\Omega = 10$) внешней нагрузки. Параметры $\alpha = 0.04$, $\gamma = 0.9$.

внешнего воздействия Ω приводит к существенному росту амплитуды скорости подвижки. Даже незначительная по амплитуде σ_0 внешняя нагрузка может вызвать сейсмическую подвижку (рис. 7). Особенно, если учесть, что на завершающей стадии подготовки землетрясения процесс становится чрезвычайно чувствительным к внешним воздействиям [4].

Таким образом, внешнее воздействие на разлом можно рассматривать как усиление волны активизации волнами накачки или деформационными волнами различной частоты, излучаемыми при ударе, взрыве или землетрясении.

Из расчетов характеристик подвижек при различных физико-механических параметрах разлома следует, что интенсивность и амплитуда скорости инициированной подвижки зависят от состояния контакта бортов разлома.

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования эффектов циклически изменяющегося трения внутри разлома и периодического внешнего воздействия на процесс развития неустойчивого скольжения по неровному разрыву показали:

1. Обобщенное уравнение sin-Гордона с учетом трения, неоднородности и периодического внешнего источника описывает основные черты деформационного процесса при инициировании подвижек по неоднородному разлому. Подбор соответствующих параметров в уравнении (1) дает возможность применять это уравнение при моделировании сейсмического процесса.
2. Внешнее периодическое воздействие является эффективным механизмом инициирования неустойчивой динамической подвижки.
3. Внешнее высокочастотное воздействие может инициировать активизацию разлома, но не обеспечивает периодическое генерирование деформационных волн и проявление сейсмических подвижек, как в случае циклически изменяющегося трения внутри разлома.
4. Основное влияние на интенсивность инициирования разлома, т.е. на амплитуду скорости подвижек v_{max} и временной интервал между ними, оказывает именно частота внешней нагрузки.
5. Увеличение амплитуды внешней синусоидальной нагрузки приводит к сокращению времени задержки инициированной сейсмической подвижки.
6. Процесс инициирования неустойчивой подвижки по разлому и особенности его протекания зависят от состояния контакта бортов разлома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 1. С.104-108.
2. Мак-Лафлин Д., Скотт Э. Многосолитонная теория возмущений // Солитоны в действии / Под ред. К.Лонгрена, Э.Скотта. М.: Мир, 1981. С.210-268.
3. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 140 с.
4. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности и управляемой разрядки тектонических напряжений // Науч. конф. «Современная сейсмология: Достижения и Проблемы», 7-9 октября, 1998 г., Москва. М., 1998. С.12.
5. Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. 1999. Т.40, № 3. С.360-372.
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С.72-78.
7. Соболев Г.А., Кольцов А.В., Андреев В.О. Триггерный эффект колебаний в модели землетрясения // Докл. АН СССР. 1991. Т.319, № 2. С.337-341.
8. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 279 с.
9. Carlson J.M. Time intervals between characteristic earthquakes and correlations with smaller events: An analysis based on a mechanical model of a fault // J. Geophys. Res. 1991.V.96, N B3. P.4255-4267.
10. Nikolaevskiy V.N. Tectonic stress migration as nonlinear wave process along earth crust faults // Proceed. of 4th Inter. Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu, Japan, 28 Sept.- 2 Oct. 1997/ Eds.: T.Adachi, F.Oka and A.Yashima. Rotterdam: A.A.Balkema, 1998. P.137-142.

Поступила в редакцию 27 января 2000 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

Model of seismic slip initiation in the inhomogeneous crustal fault

V. G. Bykov

A mathematical model of initiation of stick-slip along the crustal fault is presented. On the basis of generalized sine-Gordon equation, analysis is made of asperity and friction effects in the fault and also the amplitude and frequency of periodic load on fault dynamics. A relative role of different processes in the initiation of seismic slip is investigated.

МОДЕЛЬ ИНИЦИИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДВИЖКИ В НЕОДНОРОДНОМ РАЗЛОМЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В.Г. Быков

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г.Хабаровск

Представлена математическая модель инициирования неустойчивого скольжения по разлому земной коры. На основе обобщенного уравнения slip – Гордона проведен анализ эффектов шероховатости и трения в разломе, а также амплитуды и частоты внешней периодической нагрузки на динамику разлома. Исследована относительная роль различных процессов в инициировании сейсмической подвижки.

Ключевые слова: неустойчивое скольжение, деформационные волны, инициирование подвижки, сейсмогенерирующий разлом, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоактивные разломы непрерывно подвергаются внешним инициирующим воздействиям переменного напряжения в результате земных приливов, деформационных волн от землетрясений или гидрологических факторов [3]. При этом в активном состоянии они могут генерировать колебания и влиять таким образом на другие разломы. Зарождение сейсмической подвижки может быть инициировано также неоднородностью физических свойств вдоль разломов при постоянной величине внешней нагрузки.

В предыдущей работе [1] было показано, что локальные деформационные эффекты на мезоуровне, связанные с понижением трения в контактах неоднородных бортов разломов, способны вызывать уединенные волны активизации, эволюция которых приводит к сейсмическим подвижкам в разломах.

Возмущения, действующие на уединенную волну активизации, могут быть двоякого рода. Прежде всего, это регулярные возмущения, например, внешние постоянные или переменные геофизические поля, дефекты структуры и т.п. Во-вторых, это случайные возмущения, обусловленные как флуктуациями внешних полей, так и параметров среды. Действие возмущения на отдельную уединенную волну может привести к изменению ее скорости и, соответственно, динамики сейсмогенерирующего разлома.

В ходе полевых экспериментов [5] по инициированию микросмещений в отдельных сегментах разломов было зафиксировано запаздывание реакции разрыва на воздействие вибрации, ударов и ма-

лых взрывов. Внешнее воздействие вызывало не “мгновенное” смещение в разрыве, как при землетрясениях, но плавное, а количество микроподвижек в разломе существенно увеличивалось. Эти выводы соответствуют более ранним лабораторным экспериментам по инициированию неустойчивой подвижки на контакте блоков горных пород [6-7]. Установлено, что дополнительная вибрация приводит к уменьшению промежутка времени между последовательными неустойчивыми подвижками [6], причем время задержки начала динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды колебаний инициирующего воздействия [7].

Разработанная в [1] математическая модель неустойчивого скольжения с трением по неоднородному разлому земной коры дает качественное и количественное согласие расчетов скорости деформационных волн, смещения и скорости подвижки с реальными величинами. Там же было показано, что профиль скорости смещения v на поверхности разлома имеет форму солитона, распространяющегося вдоль разлома со скоростью V_α . Если значение V_α мало, то v - незначительно и фиксируется устойчивое криповое движение без заметного ослабления контакта. Относительно большие скорости V_α в 1-10 м/с приводят к v порядка 0,1-1 м/с и резкому увеличению смещения u до 0,2-2 м, что соответствует сейсмической подвижке.

Поскольку изменение режима скольжения связано с резким увеличением скорости V_α , то необходимо установить, какие параметры и факторы оказывают наибольшее влияние на эволюцию скорости волны активизации и инициирование сейсмической подвижки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩЕГО РАЗЛОМА

Теоретическое исследование эффектов периодически изменяющегося трения в разломе и инициирования неустойчивой подвижки проводилось на основе модели [1], дополненной функцией $\sigma(\eta)$, отражающей внешнее воздействие на контакт бортов разлома. Модифицированное таким образом обобщенное уравнение sin- Гордона [1], примет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} = \sin U + \alpha \frac{\partial U}{\partial \eta} + \gamma(\xi) \delta(\xi - L) \sin U + \sigma(\eta), \quad (1)$$

$$U = 2\pi \frac{u}{a}, \xi = \frac{\pi x}{ap}, \eta = \frac{\pi \omega_0 t}{p}, p^2 = \frac{a^2 D_t}{4mgh}, \omega_0^2 = \frac{D_t}{m},$$

$$\alpha \approx \frac{a\mu}{d\Delta\rho_s(gh)^{1/2}}, \gamma = \frac{H}{L}.$$

Здесь u - смещение блоков (зерен), периодически расположенных по длине разлома; a - расстояние между центрами блоков; D_t - тангенциальная контактная жесткость; m - масса блока; h - расстояние между соседними слоями блоков; g - ускорение силы тяжести; μ - вязкость прослойки между блоками; d - диаметр кругового контакта блоков; Δ - толщина прослойки; ρ_s - плотность материала блока; α, γ - параметры трения и неоднородности; H, L - высота шероховатостей и расстояние между ними, нормированные на ap/π ; $\delta(\xi)$ - дельта-функция Дирака.

В правой части обобщенного уравнения sin-Гордона (1) первое слагаемое характеризует восстанавливающую силу, возникающую при сдвиге вдоль синусоидально-однородных поверхностей разрыва; второе - силу трения, пропорциональную скорости относительного смещения; третье - соответствует поправкам на неоднородности, распределенные на расстоянии apL/π ; четвертое - описывает внешнее инициирующее воздействие на разлом.

Интегрирование уравнения (1) осуществлялось приближенным методом Мак-Лафлина - Скотта [2], а численная реализация проводилась по схеме Рунге-Кутты-Фельберга [8]. Задавались параметры среды: $\rho_s = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $D_t = 10^5$ Н/м, $g = 9,8$ м/с², $r = 0.1 - 1.0$ м, $a = h = 2r$. Расчеты проводились при варьировании параметров трения α и неоднородности γ , характеризующих состояние контакта в разломе, а также величины $\sigma(\eta)$, определяющей внешнюю нагрузку.

Режим скольжения по разрыву в представленной модели зависит от величины скорости V_α волны активизации и соответственно - скорости подвижки v , поэтому в дальнейшем для анализа расчетов будем использовать именно эти характеристики.

ЭФФЕКТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕНИЯ ВНУТРИ РАЗЛОМА

Эволюция скорости V_α волны активизации разлома при дополнении параметра трения α некоторой периодически изменяющейся составляющей α_1 соответствует режиму циклического внесения возмущения в некоторые сегменты разлома. Тогда параметр α в уравнении (1) переходит в $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \sin(\eta/\tau)$, где α_0, α_1, τ - некоторые постоянные.

Результаты расчетов по (1) при $\sigma(\eta) = 0, \tau = 10^2$ и вариации $\alpha_0, \alpha_1, \gamma$ показывают (рис. 1, 2), что максимум скорости V_α достигается при $t = 2-8$ с от момента возмущения, а промежуток времени, в течение которого V_α соответствует подвижке - 1-5 с. В реальных разломах при сильных землетрясениях время скольжения, действительно, составляет величину порядка секунд [9].

При постоянном параметре неоднородности $\gamma = 0.9$ максимальное значение V_α фиксируется в один и тот же момент времени, но кривые 1, 2, 3 различаются по амплитуде: наибольшему параметру трения α_0 соответствует минимальное значение V_α (рис. 1). Кривые 3 и 4, рассчитанные при различных γ и равных α_0, α_1 , в момент $t = 30$ с сливаются и далее становятся неразличимыми. Из рис. 1 также следует, что

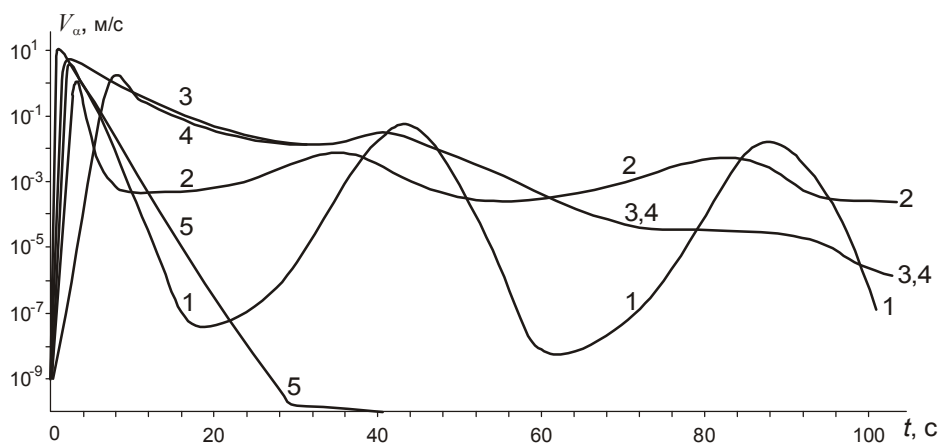


Рис.1. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.09, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.9$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.01, \alpha_1 = 0.01, \gamma = 0.1$;
- 5 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0, \gamma = 0.9$

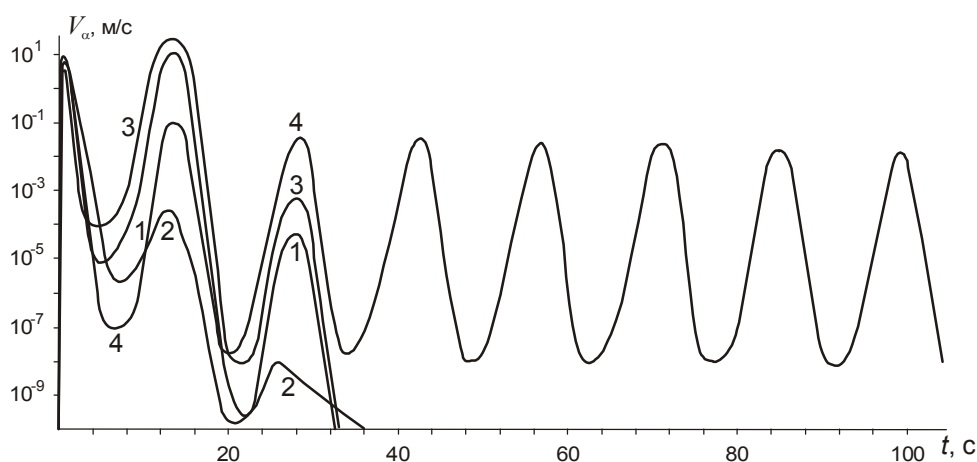


Рис. 2. Эволюция скорости V_α волны активизации при различных параметрах состояния контакта и размерах шероховатостей в разломе $r = 0.1$ м.

- 1 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.6$;
- 2 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.05, \gamma = 0.9$;
- 3 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.45$;
- 4 - $\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09, \gamma = 0.9$.

при увеличении γ максимальное значение V_α наступает намного раньше. При малых α_0 и α_1 (кривые 3 и 4) скорость V_α постепенно затухает до нуля. Более высокие значения α_0 и α_1 (кривые 1 и 2) выводят V_α на периодический режим со скоростями, близкими к скоростям быстрых деформационных волн в 1-10 км/сутки [10]. Эволюция V_α без периодически изменяющегося дополнительного трения ($\alpha_1=0$) представлена кривой 5. Этот вариант расчета соответствует единичному акту генерирования уединенной волны с переходом системы в режим “разлом заперт”.

Рис. 2 показывает, что только при определенном состоянии контакта бортов разлома, т.е. сочетании параметров трения и неоднородности, возможно периодическое генерирование волн активизации со скоростями, соизмеримыми со скоростями деформационных волн (кривая 4). В остальных случаях (кривые 1, 2 и 3) V_α относительно быстро спадает до нуля. Отличительной особенностью является то, что при более мелких неоднородностях ($r = 0.1$ м) второй максимум скорости V_α (кривые 1 и 3) превосходит по величине первый максимум.

Увеличение амплитуды α_1 периодической составляющей трения при неизменных прочих параметрах модели приводит к понижению максимального значения скорости v подвижки в разломе (рис. 3). Увеличение параметра неоднородности γ , характеризующего “зацепление” бортов разлома, наоборот, вызывает рост амплитуды скорости v_{max} подвижки.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОДВИЖКИ ВНЕШНИМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Внешнее иницирующее воздействие на разлом будем моделировать включением в уравнение (1) безразмерной периодической функции $\sigma(\eta) = \sigma_0 \sin(\Omega\eta)$, где σ_0, Ω - безразмерные амплитуда и частота внешней нагрузки, при постоянном параметре трения α . Неустойчивая подвижка без внешнего воздействия, следуя [6], в дальнейшем называется естественной подвижкой, а подвижка, возникаю-

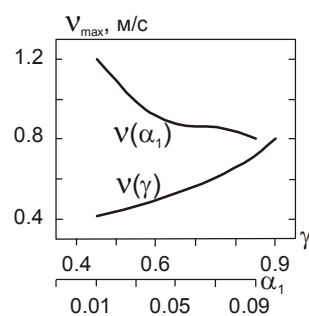


Рис. 3. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от величины периодически изменяющейся компоненты трения α_1 ($\alpha_0 = 0.02, \gamma = 0.9$) и параметра неоднородности γ ($\alpha_0 = 0.02, \alpha_1 = 0.09$).

щая при дополнительной внешней периодической нагрузке, - иницированной.

Профиль скорости V_α уединенной волны (кривые 2 и 3) по разрыву резко отличается от профиля скорости в случае естественной подвижки (кривая 1) (рис. 4,а). Если форма начальной части кривых V_α во всех случаях совпадает, то после достижения максимума она имеет существенные различия. На более высоких частотах (кривая 3) V_α представляет собой периодическую кривую, модулируемую ниспадающей частью кривой V_α , рассчитанной при отсутствии источника внешнего воздействия (кривая 1). Об этом же свидетельствует и рис. 5, на котором более детально показаны эффекты высокочастотного внешнего воздействия разной амплитуды. Низкочастотный ($\Omega=0.1$) внешний источник вызывает более плавные изменения V_α , причем внутреннее трение в разломе уже не может полностью скомпенсировать влияние внешнего источника (рис. 4,а).

Из рис. 4,б следует, что первая иницированная подвижка на любой частоте внешнего воздействия наступает всегда раньше, чем естественная подвижка (кривая 1). В этом варианте расчетов временной интервал ΔT между V_{cmax} и v_{max} при естественной подвижке (кривая 1) больше, чем при инициро-

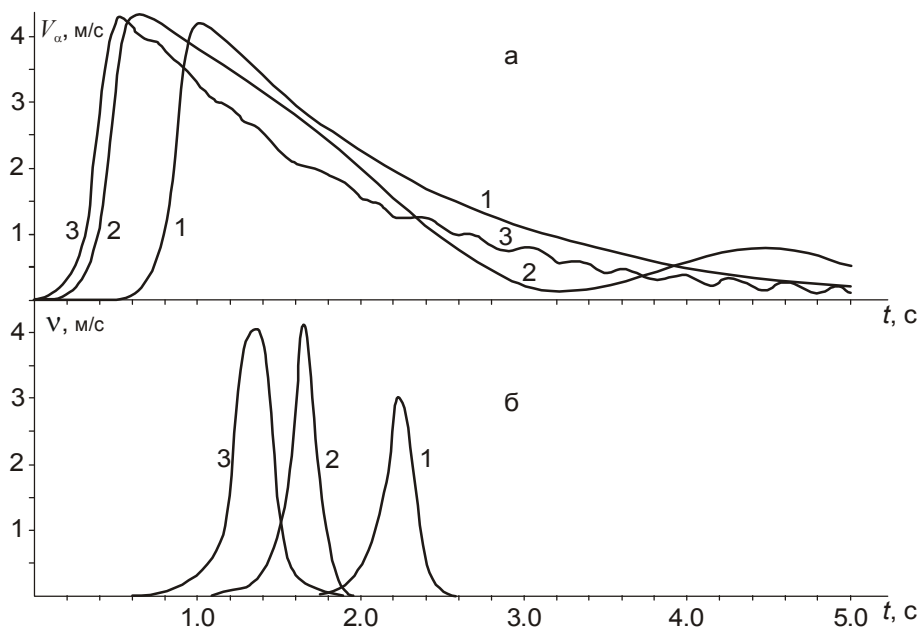


Рис. 4. Эволюция скорости волны активизации V_{α} (а) и скорости подвижки v (б) при естественной (1) и инициированной (2, 3) подвижках.

1 - $\sigma_0 = 0$, $\Omega = 0$;

2 - $\sigma_0 = 0,01$, $\Omega = 0,1$;

3 - $\sigma_0 = 0,01$, $\Omega = 1,0$.

Параметры $\alpha = 0,04$, $\gamma = 0,9$.

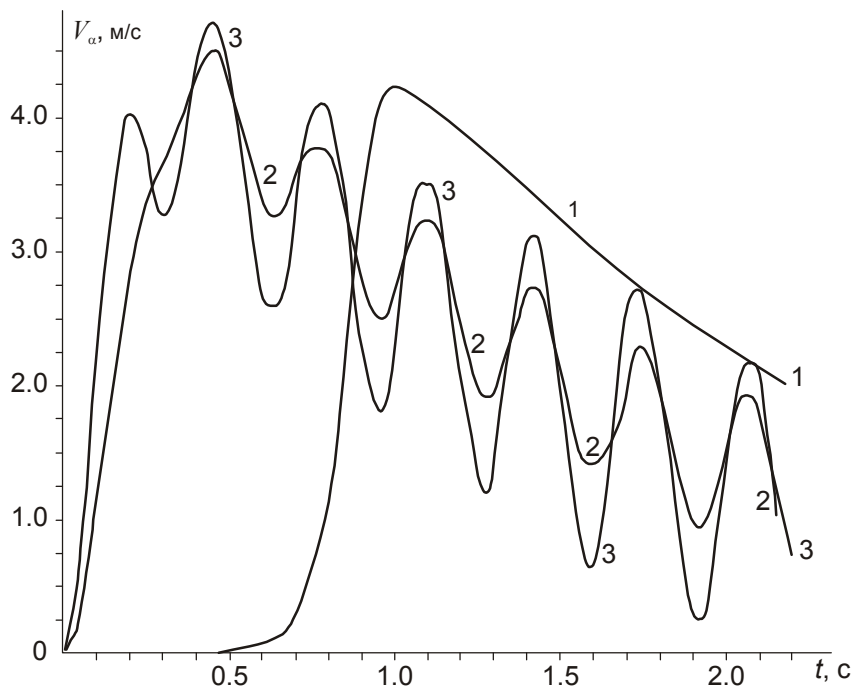


Рис. 5. Эволюция скорости V_{α} волны активизации при различных параметрах внешнего воздействия.

1 - $\sigma_0 = 0$, $\Omega = 0$;

2 - $\sigma_0 = 0,1$, $\Omega = 1,0$;

3 - $\sigma_0 = 0,2$, $\Omega = 1,0$.

Параметры $\alpha = 0,04$, $\gamma = 0,9$.

ванной подвижке (кривые 2, 3). При увеличении частоты воздействия нагрузки этот интервал возрастает. Максимальные значения скорости волны активизации V_{α} , как и скорости подвижки v_{max} , соответствуют минимальной частоте внешней синусоидальной нагрузки ($\Omega = 0,1$).

Время задержки инициированной динамической подвижки уменьшается при увеличении амплитуды внешнего воздействия (рис. 6), что находится в хорошем согласии с лабораторными [7] и полевыми [5] экспериментами. Вместо одного проскальзывания возникает несколько подвижек, причем амплитуда

скорости первой подвижки максимальна. Амплитуды скорости подвижек и временные интервалы между ними не равны. Максимумы скоростей почти всех подвижек совпадают по величине. Скорости подвижек слабо зависят от амплитуды σ_0 внешнего воздействия (рис. 6-7). Количество подвижек пропорционально амплитуде нагрузки.

С увеличением частоты постоянной синусоидальной нагрузки количество подвижек растет, а промежуток времени между последовательными подвижками уменьшается (рис. 6), что также совпадает с экспериментами [5-6]. Уменьшение частоты

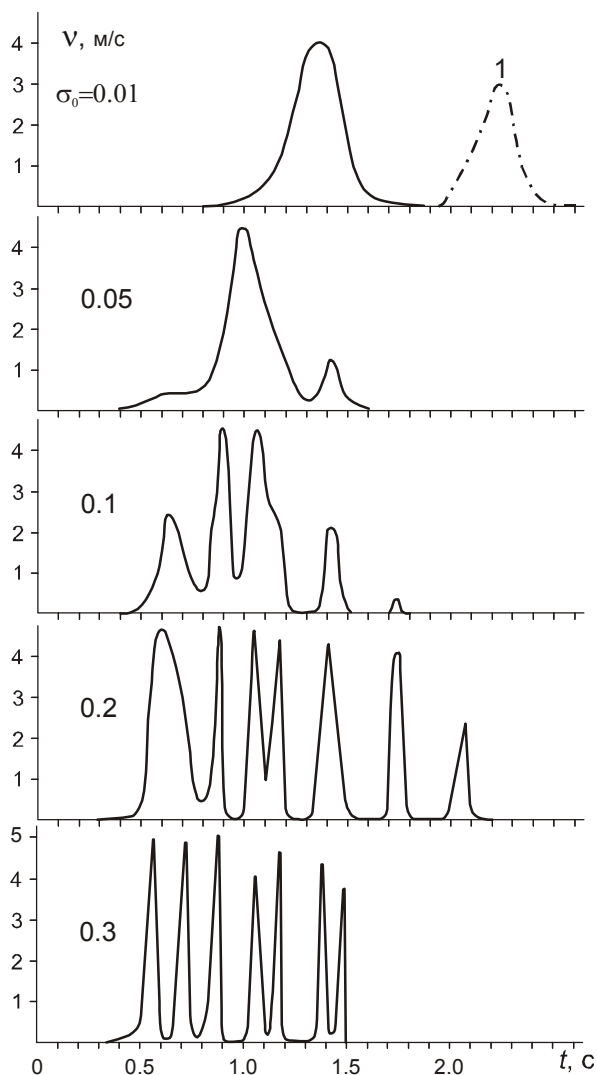


Рис. 6. Изменение скорости инициированной подвижки v при постоянной частоте внешнего воздействия $\Omega = 1,0$ и различной амплитуде нагрузки σ_0 .

1 - профиль скорости естественной подвижки. Параметры $\alpha = 0.04, \gamma = 0.9$.

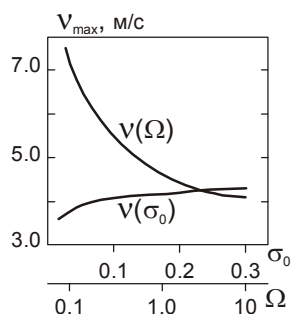


Рис. 7. Зависимость максимума скорости подвижки v_{max} в разломе от частоты Ω ($\sigma_0 = 0.1$) и амплитуды σ_0 ($\Omega = 10$) внешней нагрузки. Параметры $\alpha = 0.04, \gamma = 0.9$.

внешнего воздействия Ω приводит к существенному росту амплитуды скорости подвижки. Даже незначительная по амплитуде σ_0 внешняя нагрузка может вызвать сейсмическую подвижку (рис. 7). Особенно, если учесть, что на завершающей стадии подготовки землетрясения процесс становится чрезвычайно чувствительным к внешним воздействиям [4].

Таким образом, внешнее воздействие на разлом можно рассматривать как усиление волны активизации волнами накачки или деформационными волнами различной частоты, излучаемыми при ударе, взрыве или землетрясении.

Из расчетов характеристик подвижек при различных физико-механических параметрах разлома следует, что интенсивность и амплитуда скорости инициированной подвижки зависят от состояния контакта бортов разлома.

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования эффектов циклически изменяющегося трения внутри разлома и периодического внешнего воздействия на процесс развития неустойчивого скольжения по неровному разрыву показали:

1. Обобщенное уравнение sin-Гордона с учетом трения, неоднородности и периодического внешнего источника описывает основные черты деформационного процесса при инициировании подвижек по неоднородному разлому. Подбор соответствующих параметров в уравнении (1) дает возможность применять это уравнение при моделировании сейсмического процесса.
2. Внешнее периодическое воздействие является эффективным механизмом инициирования неустойчивой динамической подвижки.
3. Внешнее высокочастотное воздействие может инициировать активизацию разлома, но не обеспечивает периодическое генерирование деформационных волн и проявление сейсмических подвижек, как в случае циклически изменяющегося трения внутри разлома.
4. Основное влияние на интенсивность инициирования разлома, т.е. на амплитуду скорости подвижек v_{max} и временной интервал между ними, оказывает именно частота внешней нагрузки.
5. Увеличение амплитуды внешней синусоидальной нагрузки приводит к сокращению времени задержки инициированной сейсмической подвижки.
6. Процесс инициирования неустойчивой подвижки по разлому и особенности его протекания зависят от состояния контакта бортов разлома.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быков В.Г. Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 1. С.104-108.
2. Мак-Лафлин Д., Скотт Э. Многосолиitonная теория возмущений // Солитоны в действии / Под ред. К.Лонгрена, Э.Скотта. М.: Мир, 1981. С.210-268.
3. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 140 с.
4. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности и управляемой разрядки тектонических напряжений // Науч. конф. «Современная сейсмология: Достижения и Проблемы», 7-9 октября, 1998 г., Москва. М., 1998. С.12.
5. Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П. Современные движения в зонах разломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика. 1999. Т.40, № 3. С.360-372.
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С.72-78.
7. Соболев Г.А., Кольцов А.В., Андреев В.О. Триггерный эффект колебаний в модели землетрясения // Докл. АН СССР. 1991. Т.319, № 2. С.337-341.
8. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 279 с.
9. Carlson J.M. Time intervals between characteristic earthquakes and correlations with smaller events: An analysis based on a mechanical model of a fault // J. Geophys. Res. 1991.V.96, N B3. P.4255-4267.
10. Nikolaevskiy V.N. Tectonic stress migration as nonlinear wave process along earth crust faults // Proceed. of 4th Inter. Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu, Japan, 28 Sept.- 2 Oct. 1997/ Eds.: T.Adachi, F.Oka and A.Yashima. Rotterdam: A.A.Balkema, 1998. P.137-142.

Поступила в редакцию 27 января 2000 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

Model of seismic slip initiation in the inhomogeneous crustal fault

V. G. Bykov

A mathematical model of initiation of stick-slip along the crustal fault is presented. On the basis of generalized sine-Gordon equation, analysis is made of asperity and friction effects in the fault and also the amplitude and frequency of periodic load on fault dynamics. A relative role of different processes in the initiation of seismic slip is investigated.