

Моделирование медленных движений блока по границе раздела с использованием закона "Rate and state"

И.В. Батухтин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Институт динамики геосфер РАН

Изучение условий возникновения и эволюции переходных режимов может дать новую важную информацию о структуре и закономерностях деформирования разломных зон. Условно стабильные режимы деформирования границ раздела в земной коре – распространенное явление.

В настоящем докладе приведены результаты численного моделирования, направленного на изучение закономерностей движения блоков по границам раздела. Сопоставление эпюр, получаемых в расчете и лабораторном эксперименте, поставленном по классической «слайдер»-модели [1], позволило понять, какие режимы деформирования можно хорошо описать обычным эмпирическим законом «Rate and State», а какие нет. Главная задача настоящей работы – оценить границы применимости эмпирического закона Дитериха, сопоставить численные данные с экспериментальными и проанализировать возможность реализации переходных режимов с определёнными параметрами в лабораторном эксперименте. В качестве основных кинематических характеристик эпюр берется максимальная скорость и длительность события.

Основное уравнение «Rate and State»-модели (закон трения Дитериха), в соответствии с которой коэффициент трения зависит от скорости скольжения и эволюционирует в процессе перемещения, представляется в виде:

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

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

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

В состоянии стабильного скольжения с некоторой скоростью $\dot{x} = u_0$ переменная состояния θ принимает значение $\theta = D_c / u_0$. Данное значение в дальнейшем применяется в качестве начального условия при решении уравнения (2).

Уравнение, описывающее движение подвижного блока модели, имеет вид:

$$m\ddot{x} = k(u_s t - x) - F_s \quad (3)$$

где m – масса блока, k – жесткость пружины, u_s – скорость протяжки пружины, t – время, F_s – сила сопротивления сдвигу.

Описание численного решения уравнений (1) – (3) приведено в [2].

При малых положительных значениях величины Δ , изменение параметра D_c может привести к появлению режима условно стабильного скольжения, связанного с бифуркацией Хопфа, при этом критические значения параметров в точке бифуркации задается соотношением [3]:

$$\Delta_{кр} = D_c k / \sigma_N \quad (4)$$

, где σ_N – нормальное напряжение.

Рассмотрено влияние каждого из параметров модели a , b , $\Delta = b - a$ и D_c по отдельности на параметры режима скольжения. С ростом параметра Δ амплитуда динамических срывов растёт,

стремясь к линейной (рис.1а). При малых значениях D_c амплитуда срывов изменяется слабо. По мере приближения к критическому значению, определяемому соотношением (4), начинается переход от прерывистого скольжения к условно стабильному скольжению, а амплитуда скорости уменьшается быстрее (рис.1б).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проекты № 14-17-00719, 16-17-00095).

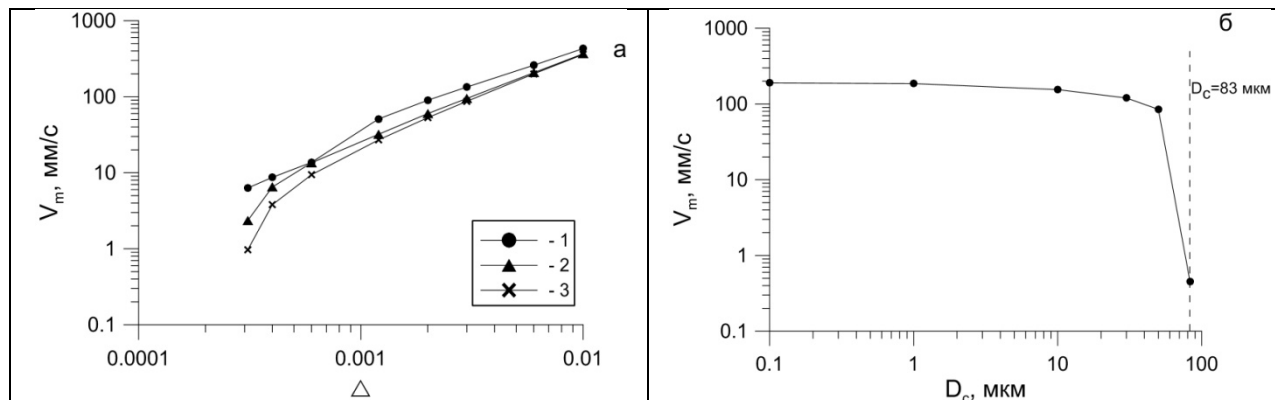


Рис.1. Зависимость максимальной скорости смещения от параметров закона «Rate and State». Параметры расчётной модели: $m=1,5$ кг, нормальная нагрузка $F_n=460$ Н, $k=28$ Н/мм, $u_s=20$ мкм/с.

а – зависимость от параметра Δ ; 1 – $a=0.01$, 2 – $a=0.001$, 3 – $a=0.0001$.

б – зависимость от параметра D_c ; $a=0.01$, $b=0.015$.

Литература

1. Павлов Д.В., Марков В.К., Свинцов И.С. Экспериментальное исследование изменения жёсткости контакта при его сдвиговом деформировании // *Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН*. Вып. 4. М.: ГЕОС. 2013. С. 110–117.
2. Будков А.М., Кочарян Г.Г., Новиков В.А., Крашенинников А.В. Модификация эмпирического закона «Rate and state frictional law» для моделирования эпизодов медленного скольжения. // *Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН*. Вып. 7. М.: ГЕОС. 2015. С. 22–30.
3. Scholz C.H. Earthquakes and friction laws // *Nature*. 1998. Vol. 391. P. 37–42, doi:10.1038/34097.