

Описание эволюции разрыва в очаге землетрясения с помощью клеточно-автоматной модели дает реалистические очаговые спектры.

А.А.Гусев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: gusev@emsd.ru

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

Вводится модель формирования пространственно-временной структуры очага землетрясения. Разлом-очаг представляется как сетка клеток. Разрушение клетки инициирует разрушение соседних клеток с случайным запаздыванием; так формируется фронт разрыва с изрезанной («кружевной») структурой. Модельные очаги имеют правдоподобные значения: (1) средней скорости фронта и (2) показателя скейлинга второй корнер-частоты.

В настоящее время генеральное устройство очагового спектра землетрясения считается известным и понятным в рамках классической модели Бруна (Рис.1 слева). Параметры этой модели: – низкочастотный уровень спектра смещения, пропорциональный площади разрыва на разломе-очаге и величине подвижки на этом разрыве (D), и частота излома в спектре, f_c («корнер-частота»), связанная с длительностью очагового процесса.

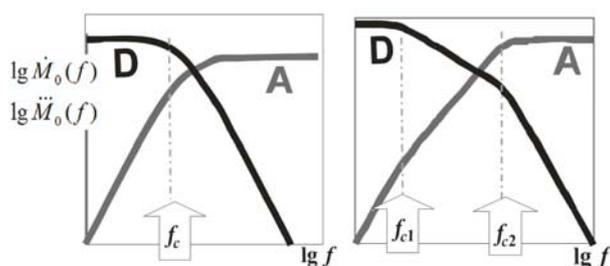


Рис 1. Схемы очаговых спектров с одной и двумя корнер-частотами

Соответствующий спектр ускорения имеет площадку на высоких частотах (А), уровень которой в большой мере определяет разрушительный эффект землетрясения. Однако реальные спектры сложнее и обычно имеют две корнер-частоты f_{c1} и f_{c2} (рис.1 справа). Природа f_{c1} понятна – она та же, что для f_c в модели Бруна; в то время как механизм формирования второй корнер-частоты - f_{c2} - пока неизвестен.

В работе развивается далее модель [1], в которой параметр f_{c2} связывается с шириной фронта бегущего разрыва. Считается, что этот фронт негладкий и имеет случайную, «кружевную» геометрию. На рис. 2 дана иллюстрация к этой концепции.

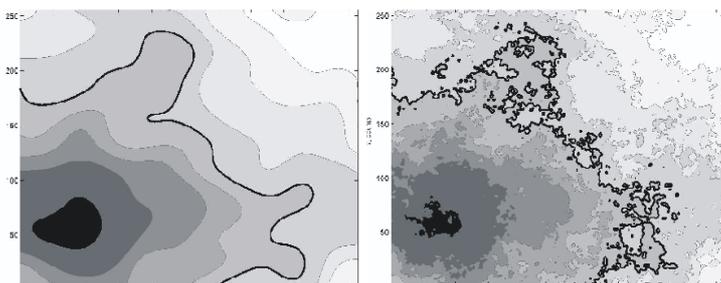


Рис 2. Схема распространения очагового разрыва в обычном представлении (слева), когда фронт считается гладкой линией; и предлагаемый вариант «кружевного» фронта (справа). Тон заливки кодирует время: чем позже, тем светлее.

В настоящей работе данная концепция реализована на основе дискретного описания кинематики фронта разрыва с использованием эволюционирующей клеточной модели со случайным поведением. Каждая клетка модели - это однотипный автомат с непрерывным временем. Переходы между состояниями клетки управляются состояниями и свойствами соседей. После получения сигнала от соседа (включения, «поджига»), клетка переходит в разрушенное состояние с определенным запаздыванием DT . Значения DT меняются от клетки к клетке и образуют случайное поле с дальней

корреляцией («вмороженный беспорядок»). Формально, применная модель представляет собой асинхронный клеточный автомат. Содержательно, запаздывание в каждой клетке отражает локальную прочность разлома: чем прочность выше, тем запаздывание больше. После внесения затравки по сетке клеток распространяется возмущение-разрыв. Основные параметры модели: среднее запаздывание в клетке, τ ; и показатель, η , степенного спектра поля значений запаздывания: $DT(k) \sim k^{-\eta}$. Проведено моделирование многих вариантов модели с различными τ и η . При использовании подходящих значений параметров формируется распространяющийся фронт с «кружевной» геометрией и правдоподобной средней скоростью - 50-90% от скорости S волн (рис. 3).

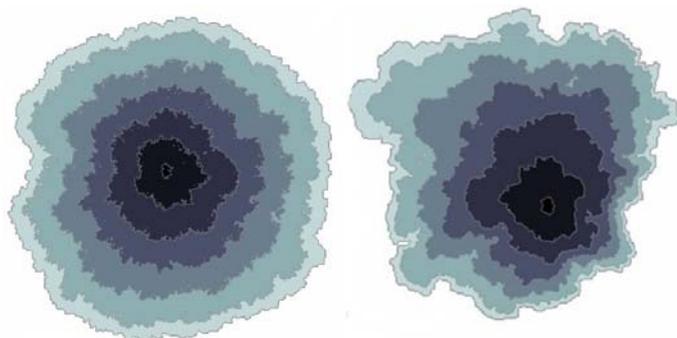


Рис 3. Два варианта модельного разрыва с различной степенью изрезанности фронта. Приведены мгновенные фотографии очага для набора последовательных моментов времени. Сетка клеток - 300×300. Тон заливки кодирует время: чем позже, тем светлее.

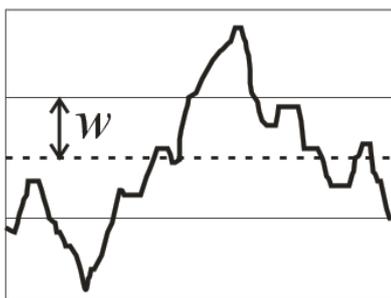


Рис. 4. Схема расчета оценки среднеквадратической ширины фронта, w . Штриховая прямая соответствует форме фронта при отсутствии искажающих возмущений (все DT нулевые или постоянные), или, что то же самое, средней линии фронта. Жирная линия – фактическая извилистая форма фронта. Тонкие прямые отстоят от средней линии фронта на расстояние w , равное стандартному отклонению.

Особый интерес представляло моделирование зависимости среднеквадратической ширины фронта, w от времени, (рис. 4), и, тем самым, от мгновенного размера очага, L . Ранее [1] была обоснована прямая пропорциональность между $1/w$ и f_{c2} . Поэтому о реалистичности развитой модели можно судить по характеру зависимости w от L . Такая зависимость была построена для ряда вариантов параметров τ и η (рис. 5). При подходящем выборе этих параметров полученная зависимость вполне согласуется с наблюдаемым скейлингом f_{c2} , типа $\lg f_{c2} = (0,15-0,25) \lg M_0 + const$ (где M_0 - сейсмический момент очага). В рамках принятой модели, на основе сопоставления с наблюдениями, получены интервальные оценки ее параметров:

$$\tau = 2,5-8, \quad \eta = 0,25 - 0,75 .$$

Эти оценки физически допустимы и не указывают на какие-либо существенные внутренние противоречия.

Также проведено моделирование объемных волн, порождаемых подобным очагом землетрясения, рис. 6. Временная функция ускорения (акселерограмма)

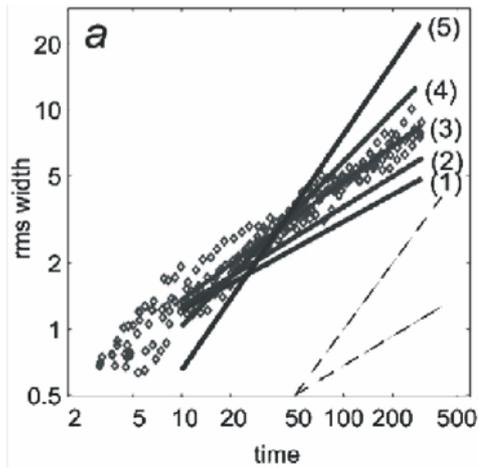


Рис. 5. Характер нарастания w во времени для ряда вариантов модели с различными значениями параметра η при $\tau = 4$ (в билогарифмическом масштабе). Мгновенный размер очага, L , пропорционален времени (очаг растет примерно с постоянной скоростью), так что зависимость $L(w)$ аналогична. Прямые аппроксимируют серии точек, полученных при многократном моделировании методом Монте-Карло, такая серия точек показана для прямой 3. Наклон прямых 1 и 2 находится в диапазоне 0,5-0,6, что приемлемо согласуется с оценками на основе наблюдений.

шумоподобна, в ее спектре имеются две корнер-частоты и площадка. Таким образом удастся дать модельное описание важных характерных свойств сейсмических волн от реальных землетрясений. Модель может оказаться полезной для синтеза модельных сильных движений грунта.

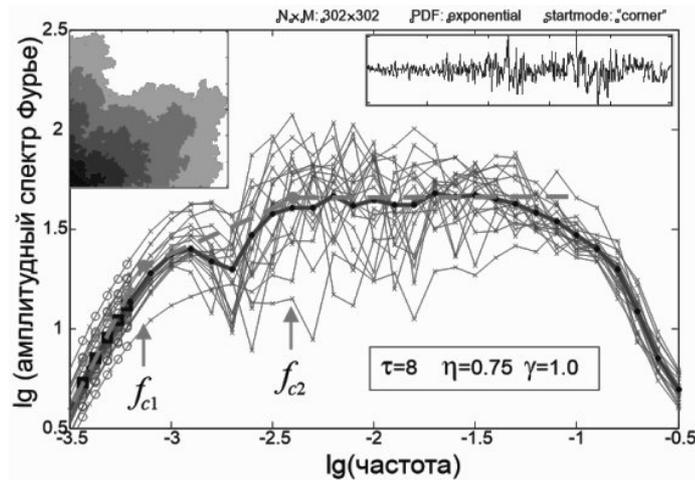


Рис.6. Пример моделирования очагового спектра ускорения (пропорционален спектру акселерограммы в идеальной среде). Тонкие линии - индивидуальные спектры акселерограмм (20 вариантов); жирная линия - средний спектр. На врезках сверху: слева - пример истории разрыва, справа - пример акселерограммы. Видно наличие двух корнер-частот в спектре. Спад спектра на высоких частотах определяется конечным размером клетки модельного очага, но предположительно имеет и физический смысл, отражая так называемую «f-max очагового происхождения» или третью корнер-частоту. Частота, время и уровень спектра - в безразмерных единицах.

Список литературы

1. Gusev, A.A. Doubly stochastic earthquake source model: “omega-square” spectrum and low high-frequency directivity revealed by numerical experiments.// Pure Appl. Geophys. 2014, 171, 2581-2599. DOI 10.1007/s00024-013-0764-9