### А. А. Гусев

# Новый подход к описанию очаговых спектров землетрясений: численная

модель очага со спектром «омега-квадрат»

1

# Предлагается новая «дважды стохастическая» модель очага землетрясения (ДСМОЗ),

чтобы объяснить три обычные свойства очагового излучения: 👞

- (1) форму очаговых спектров (смещения) типа @ <sup>-2</sup> («омега-квадрат») [Aki 1967; Brune 1970]
   [или, что то же самое, плоские очаговые спектры ускорения [Brune 1970; Hanks&McGuire 1981]]
- (2) очаговые спектры с двумя углами/изломами, типа ω<sup>0</sup> -ω<sup>-1</sup> -ω<sup>-2</sup> ( при М≥5-6) [Brune 1970; Gusev 1983]
- (3) частотно-зависимую направленность излучения [Somerville 1997]

 Image: state of the state of t



эти свойства хорошо известны, но для них нет непротиворечивого теоретического объяснения

#### Типичная запись землетрясения: 8 июня 1993, Ходутка, М7.5, R≈80 км, акселерограмма

видна площадка в спектре ускорения



Эмпирические законы масштабирования (скейлинг) для спектров Фурье ускорения (они близки к кочаговым спектрам ускорения) Видно поведение типа  $\omega^0 - \omega^{-1} - \omega^{-2}$ : имеются два угла/излома; разрыв между ними растет с магнитудой









#### Базовая модель очага: по Хаскеллу-Аки-Хитону: Модель очага как бегущей дислокации конечной ширины (Haskell 1964-1966)



### Ключевые элементы ДСМОЗ

- 1. Поле локального сброшенного напряжения <u>До(x,y)</u> на площадке очага :
  - случайное, фрактальное
- 2. Локальная структура фронта разрыва при высоких *k* : *случайная, фрактальная, фрагментированная, извилистая*
- 3. Сглаженная/генерализованная структура фронта разрыва при малых *k*:

*систематическая*, согласно концепции бегущего «импульса подвижки»

 Формирование сейсмических волн: согласно модели разрушения неровности/«asperity» на разломе

# Стохастическая/случайная компонента №1 ДСМОЗ – поле локального сброшенного напряжения $\Delta \sigma(x, y)$ [Andrews 1980]

пространственное поведение, не связано с *t* 



•  $\Delta \sigma(x, y)$  - это случайное 2D поле; задано своим спектром мощности P(k), либо своим средним амплитудным спектром  $S(k) \sim P^{0.5}(k)$ [Andrews 1980]  $(k=|\mathbf{k}|)$ 

• S(k) – степенная функция ( $S(k) \sim k^{-\beta}$ ) [диктует автомодельное или фрактальное поведение] [Andrews 1980]; и в частности:

• *β*=1 and *S*(*k*) ~ *k*<sup>-1</sup> [автомодельное поведение в узком смысле] [Andrews 1980]

•  $\Delta \sigma(x, y)$  жестко связан с полем финальной дислокации/подвижки D(x, y) [со спектром ~  $k^{-\beta - 1}$ ]

#### Стохастическая/случайная компонента №2 ДСМОЗ : локальная структура фронта разрыва при высоких *k* [*Gusev* 2012]

#### определяет эволюцию

#### разрыва в пространстве-времени



*example isolines of*  $t_{fr}(x, y)$  shading: the later, the lighter

• задает историю разрыва через **«время прихода** фронта»  $t_{fr}(x, y)$ , причем

• *t<sub>fr</sub>(x, y)* имеет «кружевной» вид, а именно: (а) изолинии извилисты

(b) фронт фрагментирован,

с «островами» и «озерами»

*t<sub>fr</sub>(x, y)* можно представить как суперпозицию
(1) гладкого (малые *k*) «макроскопического»
распространения разрыва с определенной
средней скоростью вспарывания; и
(2) случайного локального (высокие *k*)
«микроскопического» распространения разрыва
в случайных направлениях
(так возникает некогерентность)



#### Причина некогерентности: случайная локальная ориентировка фронта разрыва Цвет кодирует направление нормали к фронту



12

#### Компонента №3 ДСМОЗ:

распространение разрыва с импульсом подвижки "slip-pulse" (с выраженным фронтом залечивания) [Heaton 1990]



- детальная история разрыва включает бегущий фронт залечивания
- вводится критический параметр «относительная ширина импульса»

$$C_H = \frac{l}{L}$$

где: *L* длина очага *l* ширина импульса подвижки

ИЛИ

$$C_{H} = \frac{T_{rise}}{L / v_{rup}}$$

где:

 $T_{rise}$  – время нарастания подвижки (rise time);

 $v_{rup}$  - средняя скорость вспарывания

#### Компонента №4 ДСМОЗ:

#### Применение модели разрушения неровности/«asperity» на разломе [Das&Kostrov 1983,1986б 1987] для описания формирования сейсмических волн:

Пусть dS – разрушающееся пятно-склейка в позиции (*x*, *y*) на разломе  $\Sigma$ , окруженное областью пренебрежимого сцепления, размер которого бесконечен (*Случай* 1) или конечен, размера  $2R_r$  (*Случай* 2). Фронт разрыва приходит к dS в момент  $t_{fr}$ .

Рассмотрим решения для волн SH в дальней зоне; для скорости в волне на луче вдоль нормали

**Случай 1**:  $d\dot{u}^{SH,\infty}(\xi, t + R/c_S) = A\Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$ бесконечный разлом  $\dot{u}^{SH,\infty}(\xi, t + R/c_S) = A\int_{\Sigma}\Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$ 

Канализованные разломом волны (неоднородная S, R) уходят на бесконечность

*Случай* 2:  $d\dot{u}^{SH}(\xi, t + R/c_S) = G(t) * A\Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$ конечный разлом  $\dot{u}^{SH}(\xi, t + R/c_S) = G(t) * A \int_{\Sigma} \Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$ где G(t) имеет нулевой интеграл и длительность порядка  $2R_{r}/c_{R}$ 

Канализованные разломом волны (неоднородная **S, R**) дифрагируют/конвертируются в обычные объемные волны на границе и гаснут

2R

#### Разрушение неровности/«asperity» на разломе: объемные волны в дальней зоне



Ключевая гипотеза для применимости теории Дас-Кострова:

#### пятно низкого сцепления (размером 2*R*<sub>r</sub>) *можно отождествить*

с куском полосы импульса подвижки (шириной *l*)

так что соответствующие размеры близки друг к другу:



Для каждого элемента фронта разрыва *dS*, имеется свое индивидуальное пятно низкого сцепления



# Другие упрощения, принятые при моделировании:

- Сброс напряжения происходит мгновенно по приходе фронта разрыва (зона сцепления очень узка)
- Рассматриваются лишь волны *SH*
- *Т<sub>гіse</sub>* или *l* мало меняются по площадке очага
- Функцию G(t) (временной ход вклада точки очага в сейсмограмму скорости) можно считать идентичной для всех точек очага (  $G(t,x,y) = G_0(t)$ )





## Шаги моделирования

в скобках - принятые значения параметров

- (**a**) задать прямоугольник-очаг (38 ×19 км,, точку старта и т. п.
- (b) задать управляющие параметры:  $\beta$  (1.0),  $C_H$  (0.06),  $CV_{\Delta\sigma}$  (0.8),  $\delta$  (1.4);
- (c) генерировать реализации случайных полей

 $-t_{fr}(x, y)$  и  $\Delta \sigma(x, y);$ 

- (d) рассчитать сейсмограммы в приемнике для случаев бесконечного и конечного очага
- (e) найти нормализованный амплитудный спектр Фурье смещения и соответствующий спектр ускорения

## Моделирование: примеры сигналов и спектров



• приемник на луче, нормальном к площадке очага



#### Моделирование: как форма спектра зависит от относительной ширины импульса подвижки C<sub>H</sub>=l/L Average normalized spectra $C_{u} = 0.0075$ спектры с двумя 0 четкими изломами 0.015 при *C<sub>H</sub>*≤ 0.05 0.03 log<sub>10</sub> u<sub>n</sub>(f), примерно "*m*<sup>-1</sup>" 0.06 классическая форма промежутипа «омега-квадрат» 0.12 точный при С<sub>*H*</sub>≈0.06-0.10 log<sub>10</sub> ü<sub>n</sub>(f), наклон -2 Вариант масштабирования параметров: f<sub>c2</sub> и -3 Ntry=50 уровня ВЧ спектра А<sub>нг</sub>: $f_{c2}/f_{c1} \approx 0.2/C_H$ $A_{HF}/A_{1HF} \approx 0.063/C_H$ -2 0 $\log_{10} f$ , Hz приведены средние по 50 реализациям

## Как модельные спектры зависят от направления на приемник (относительно направления вспарывания разрыва): видна частотно-зависимая направленность



Перспектива – моделирование кинематики случайного разрыва с кружевным фронтом с помощью клеточных моделей («автоматов»



#### Цвет кодирует время от старта

#### Точки-мгновенный излучатель

## Выводы

- 1. Предложенный подход позволяет воспроизвести, путем численного эксперимента, следующие наблюдаемые черты излученных очагом сейсмических волн:
  - ВЧ ветвь спектра типа  $\omega^{-2}$ ;
  - форму спектров с двумя изломами (двумя корнер-частотами), и
  - частотно-зависимую направленность (высокую на НЧ, низкую на ВЧ)
- 2. Чтобы достичь этого результата, предложена дважды стохастическая модель очага землетрясения, которая объединяет две случайные самоподобные/фрактальные структуры, одну в пространстве, другую в пространстве-времени
- 3. Предложенная модель кинематическая и численная. Она тем не менее достаточно гибкая и может быть приспособлена для практического моделирования сильных движений при землетрясении.

# Благодарю За внимание

# Two possible ajustments may be needed; **both ignored** in further simplified simulation

- Along-front size of slipping spot above *l*: as there is more free space for alog-fault waves to propagate
- Across-width size of slipping spot below *l*: as the healing front does not stand and approaches at comparable velocity



