

**Спектры смещения типа «омега-квадрат» - ожидаемые  
свойства излучения от очага землетрясения с бегущим  
импульсом подвижки, случайным самоподобным  
распределением сброшенного напряжения и со случайным  
«кружевным» фронтом разрыва**

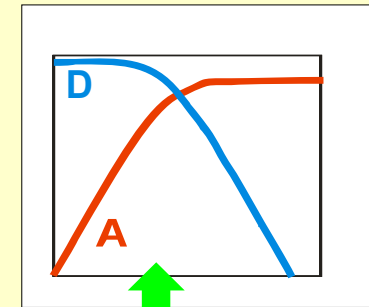
***А. А. Гусев***

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
Камчатский филиал ГС РАН  
E-mail: [gusev@emsd.ru](mailto:gusev@emsd.ru)

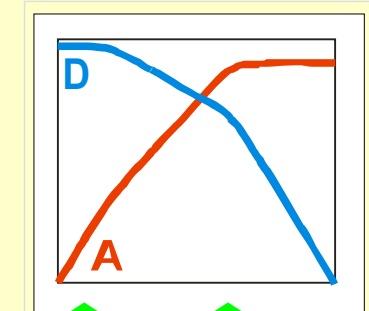
# Предлагается новая «дважды стохастическая» модель очага землетрясения (ДСМОЗ), чтобы объяснить три обычных свойства очагового излучения: The

- (1) форму очаговых спектров (смещения) типа  $\omega^{-2}$  («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  $\omega^0 - \omega^{-1} - \omega^{-2}$  (при  $M \geq 5-6$ ) [Brune 1970; Gusev 1983]
- (3) частотно-зависимую направленность излучения [Somerville 1999]

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



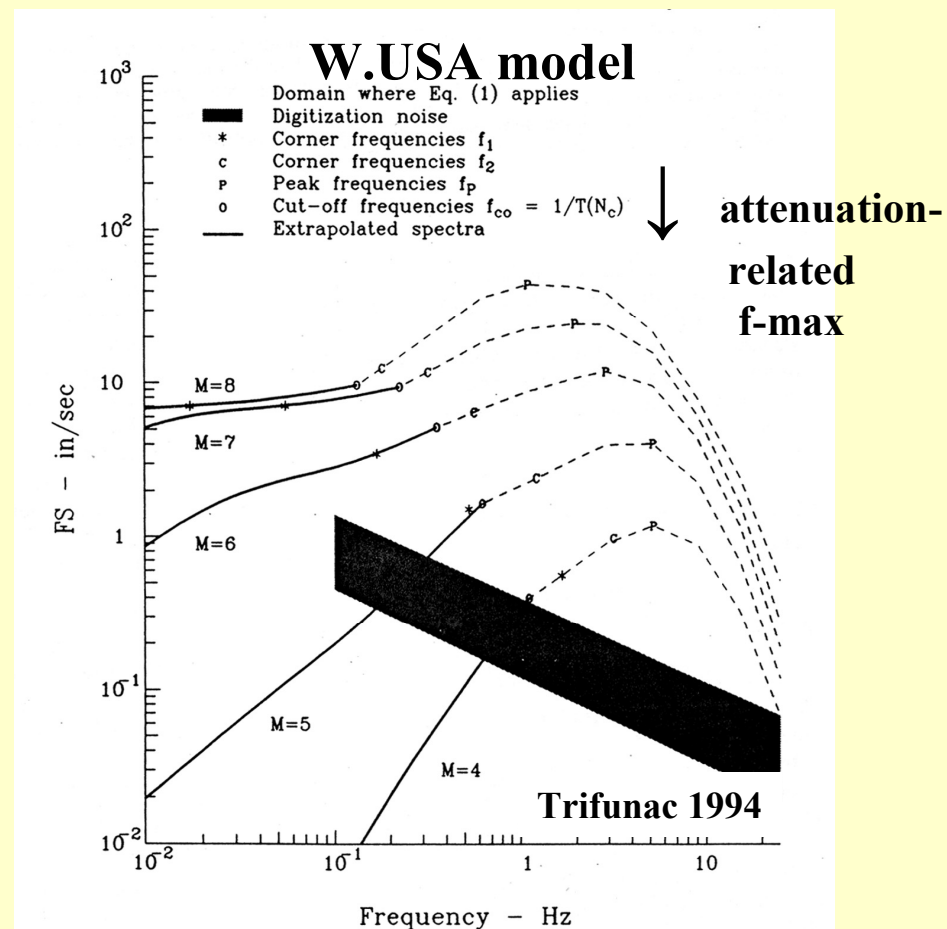
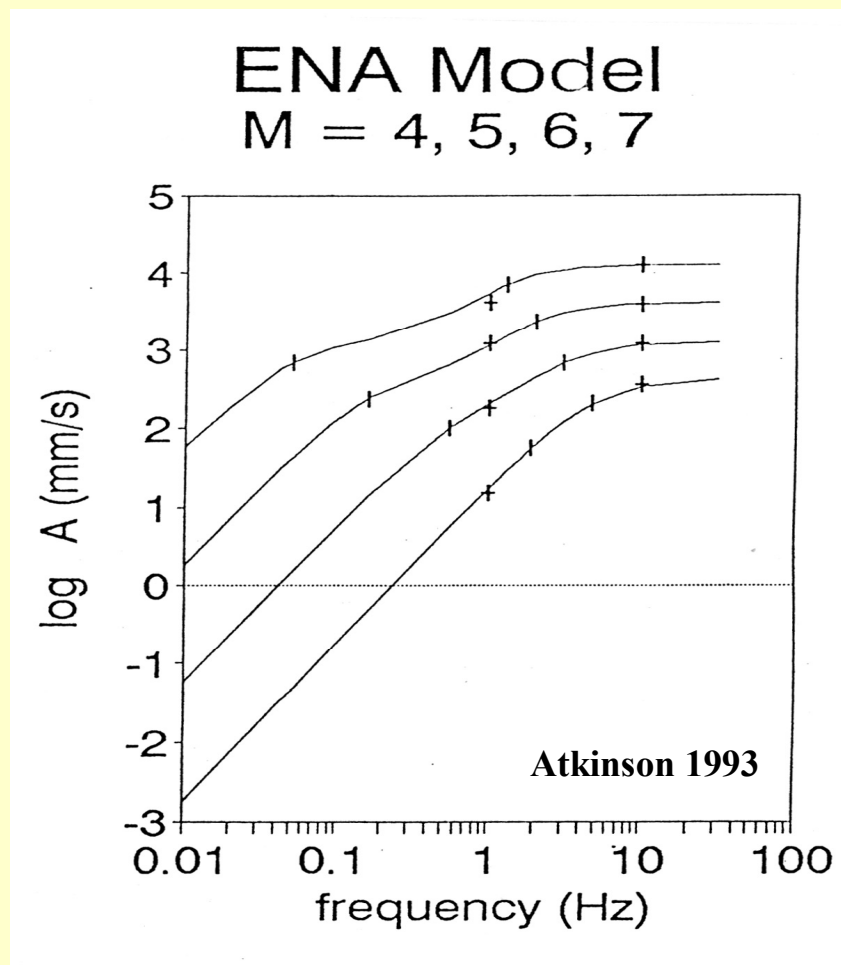
$f_c$



$f_{c1}$

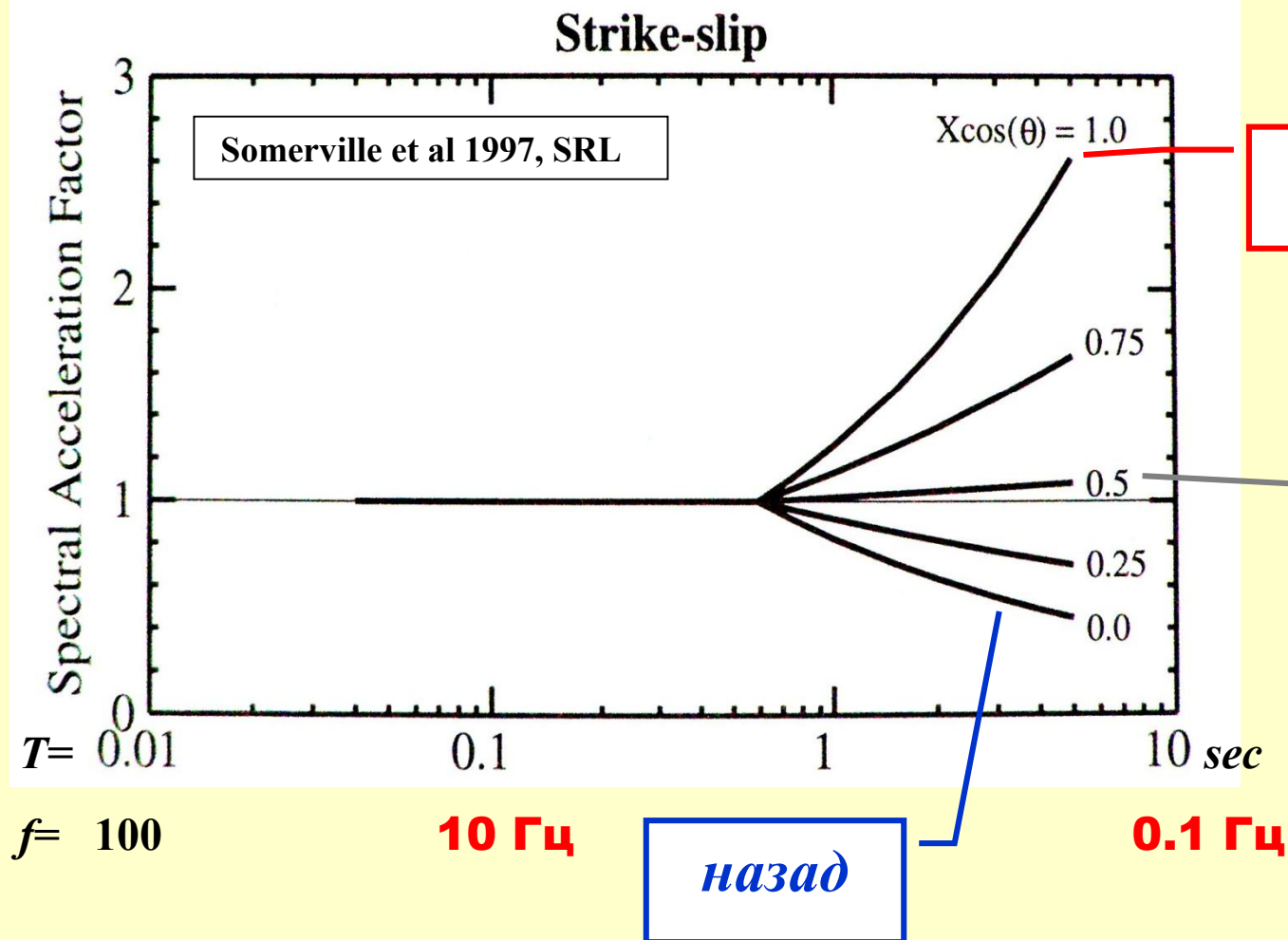
$f_{c2}$

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*



# Зависимость среднего коэффициента направленности (проявление «Допплер-эффекта») от периода/частоты

для амплитуды спектра реакции ускорения RSA, для вариантов угла между направлением распространения разрыва и направлением луча к приемнику



**вперед**

**вбок**

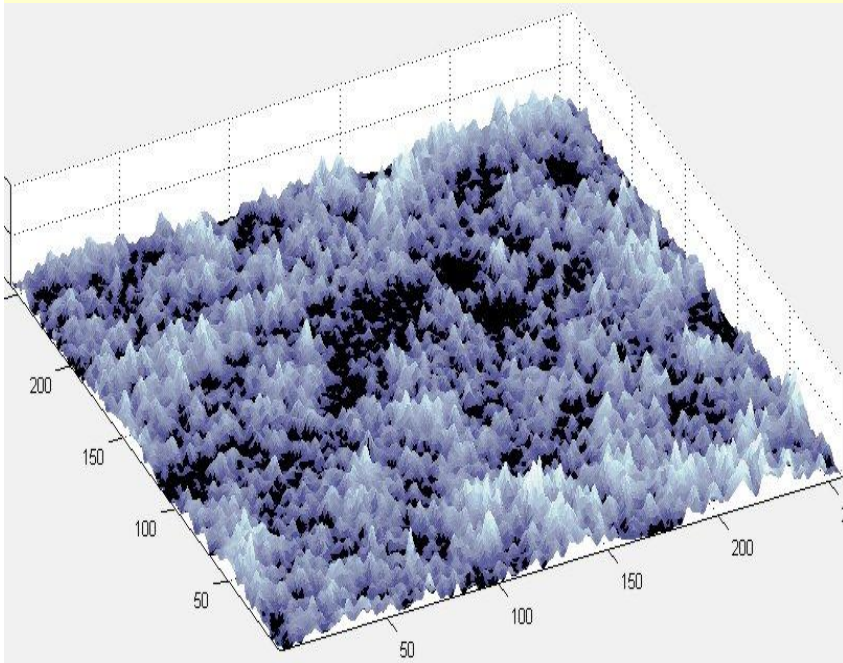
$X\cos(\theta)$ :  
X measures degree of  
unilaterality  
(0 for bilateral)  
 $\theta$  is angular deviation  
from  
forward direction (0 to 180)

## Ключевые элементы ДСМОЗ

- 1. Поле локального сброшенного напряжения  $\Delta\sigma(x,y)$  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»
- 4. 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]

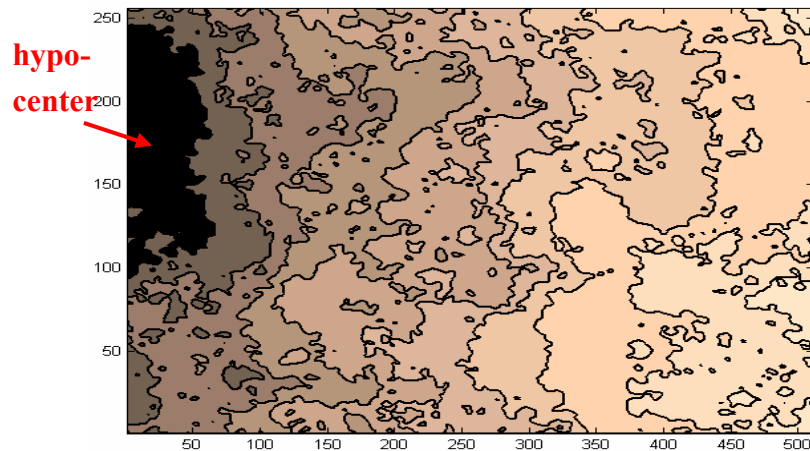
пространственное  
поведение, не связано с  $t$



- $\Delta\sigma(x, y)$  - 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:
- $\beta=1$  and  $S(k) \sim k^{-1}$  [автомодельное поведение в узком смысле] [Andrews 1980]
- $\Delta\sigma(x, y)$  жестко связан с полем финальной дислокации/подвижки  $D(x, y)$  [со спектром  $\sim k^{-\beta-1}$ ]

## 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
- $t_{fr}(x, y)$  имеет «кружевной» вид, а именно:
  - (а) изолинии извилисты
  - (б) фронт фрагментирован, с «островами» и «озерами»
- $t_{fr}(x, y)$  можно представить как суперпозицию
  - (1) гладкого (**малые  $k$** ) «макроскопического» распространения разрыва с определенной средней скоростью испарывания; и
  - (2) случайного локального (**высокие  $k$** ) «микроскопического» распространения разрыва в случайных направлениях  
**(так возникает некогерентность)**



$t_{fr}(x, y)$ : **исходная**,

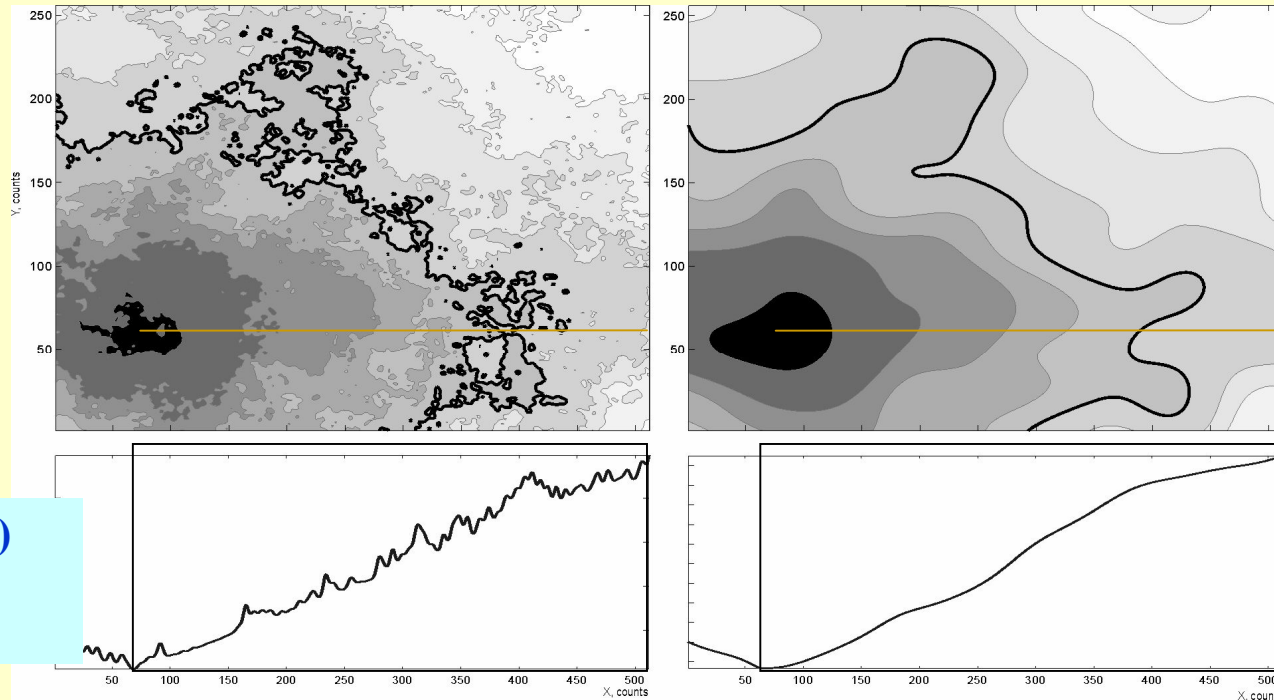
$t_{fr}(x, y)$ : **сглаженная**,

**полный  
 $k$ -спектр  
фрагментиро-  
ванные  
изолинии**

**ТОЛЬКО  
малые  $k$   
гладкие  
изолинии**

**профиль (желтый)  
 $t(x)$  немонотонное  
 $x(t)$  многозначное**

**профиль (желтый):  
 $t(x)$  монотонное  
 $x(t)$  однозначное**



Алгоритм генерации  $t_{fr}(x, y)$

$$t_{fr}(x, y) = R(x, y) + S(x, y)$$

$R(x, y)$ : **случайная автомодельная**, спектр  $\sim 1/k^\delta$ ;  $\delta=1-1.5$ ;

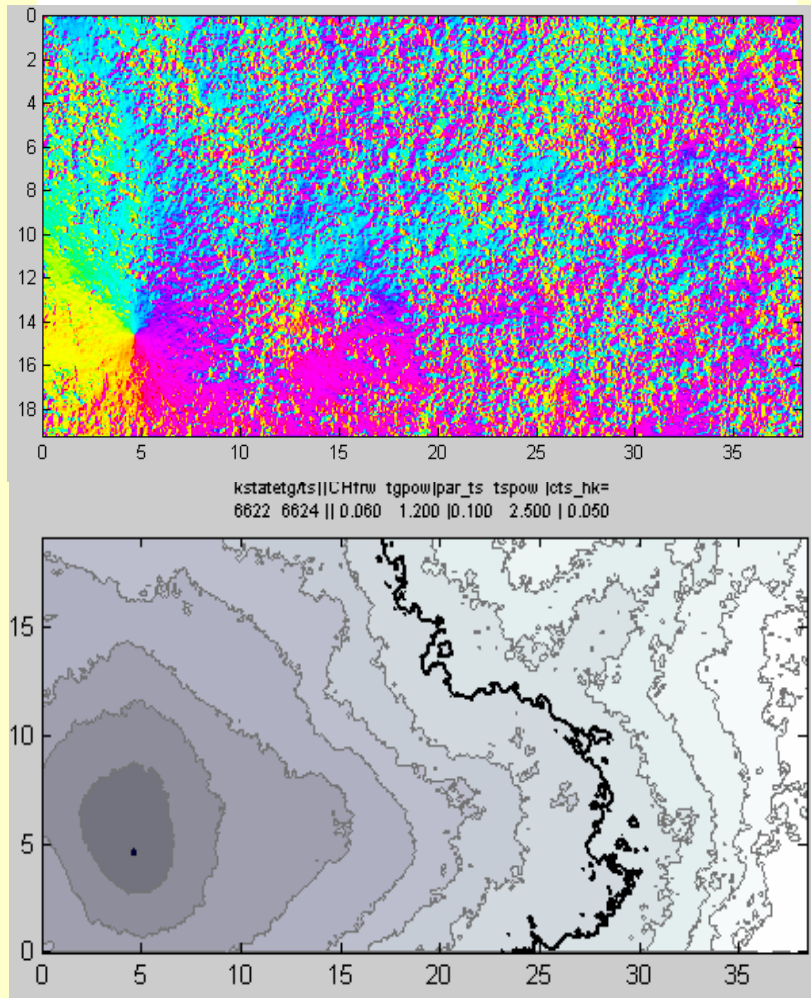
$S(x, y)$ : **гладкая**, детерминистическая + гладкое возмущение



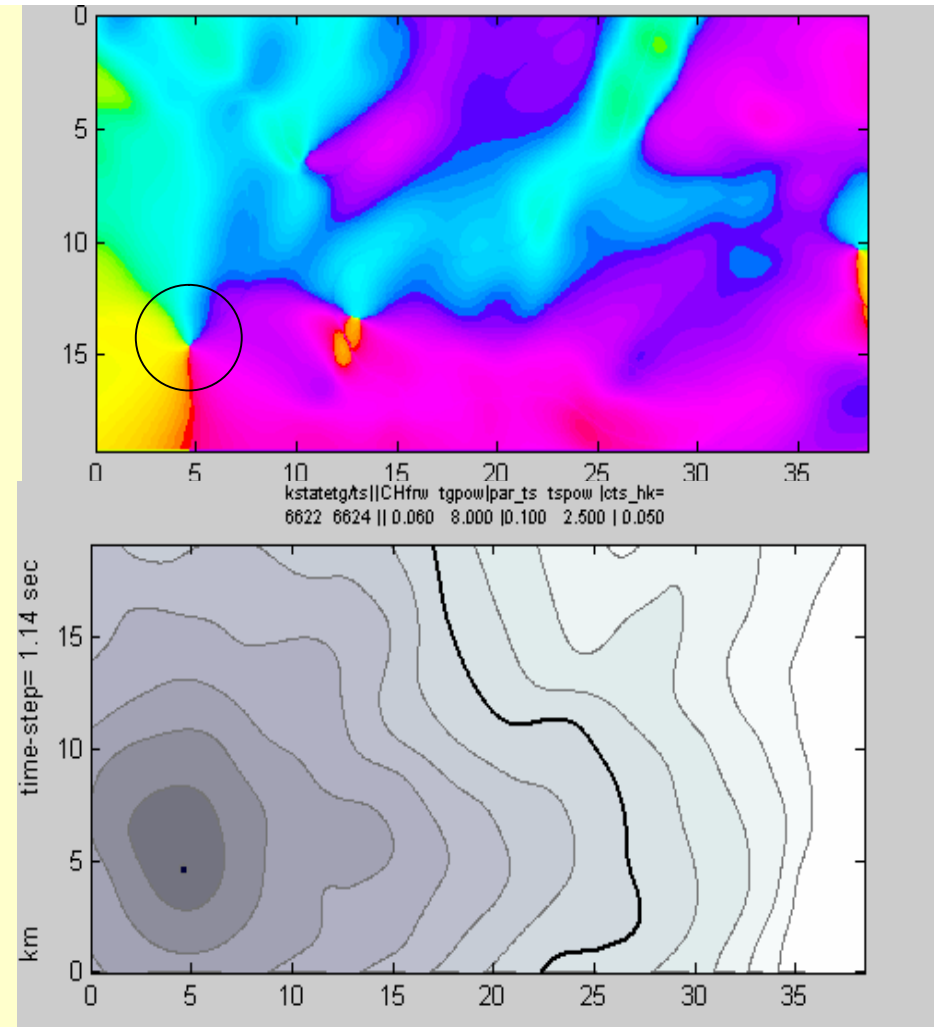
# Причина некогерентности: случайная локальная ориентировка фронта разрыва

Цвет кодирует направление нормали к фронту

некогерентный случай (основной)

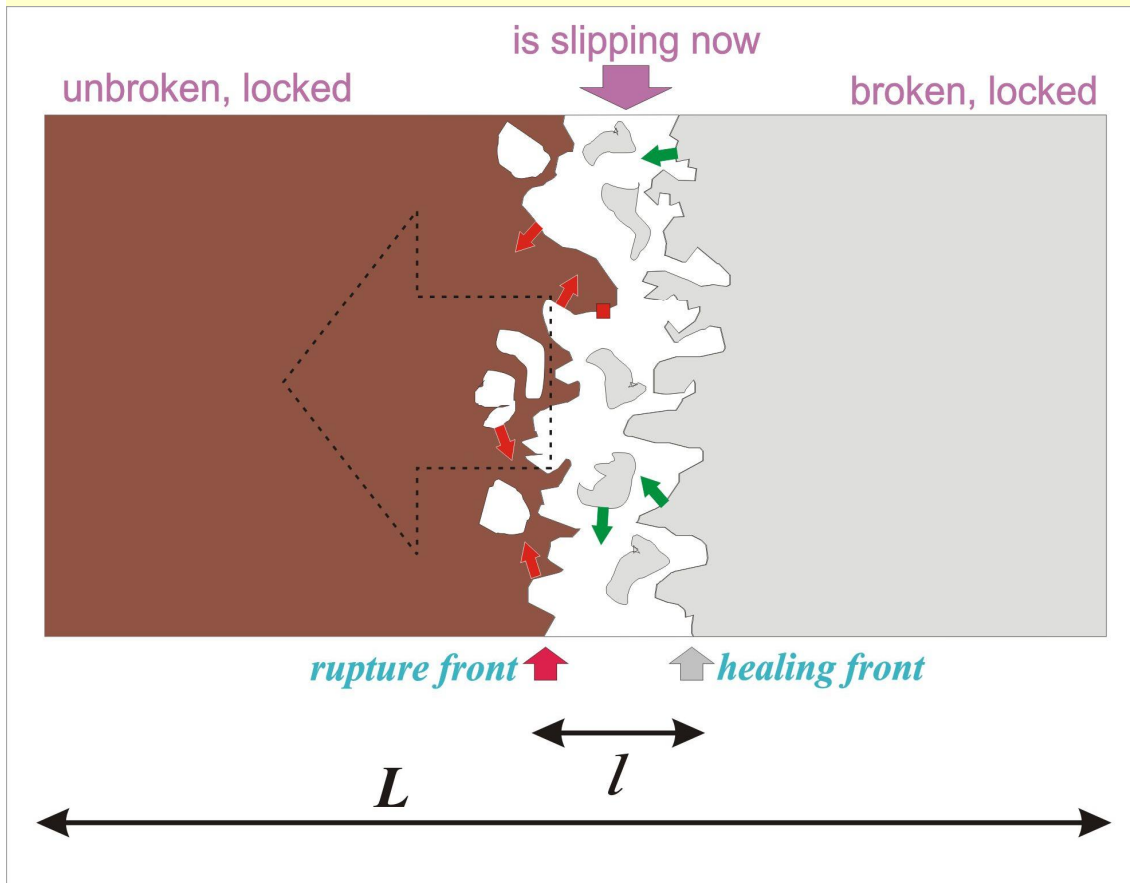


«когерентный» случай (только как иллюстрация)



6/27/2018

Компонента №3 ДСМОЗ:  
распространение разрыва с импульсом подвижки "slip-pulse"  
(с выраженным *фронтом залечивания*) [Heaton 1990]



типичные значения  $C_H$  :  
около 0.1 [Heaton 1990]

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

$$C_H = l/L$$

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  $dS$  – разрушающаяся 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:**  
бесконечный разлом

$$d\dot{u}^{SH,\infty}(\xi, t + R/c_s) = A\Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$$

$$\dot{u}^{SH,\infty}(\xi, t + R/c_s) = A\int_{\Sigma} \Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$$

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

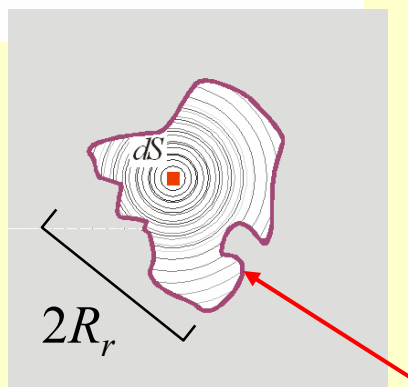
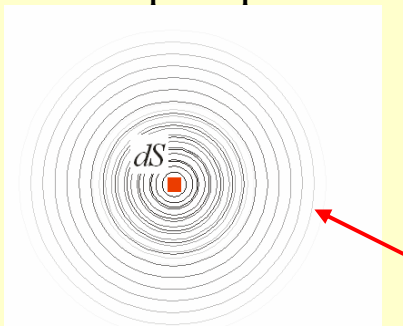
**Случай 2:**  
конечный разлом

$$d\dot{u}^{SH}(\xi, t + R/c_s) = G(t) * A\Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$$

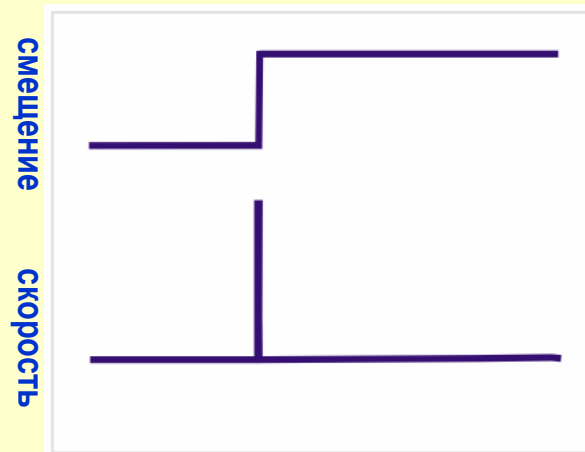
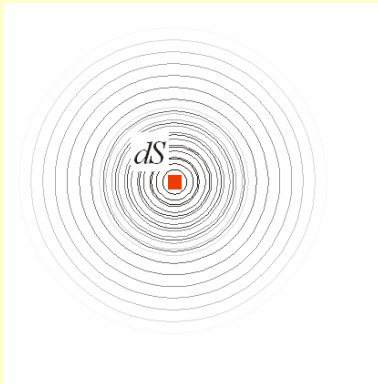
$$\dot{u}^{SH}(\xi, t + R/c_s) = G(t) * A\int_{\Sigma} \Delta\sigma(x, y)\delta(t - t_{fr}(x, y))dS$$

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*

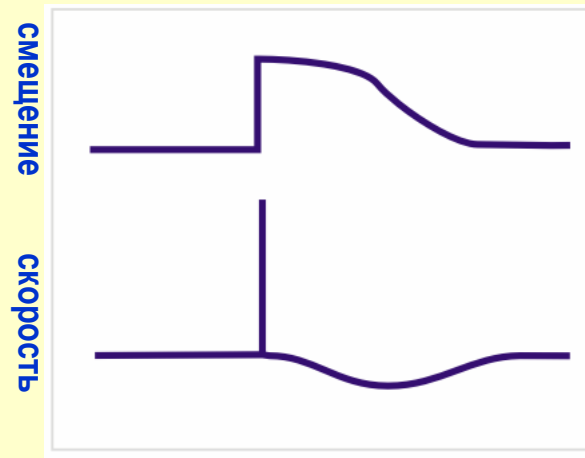
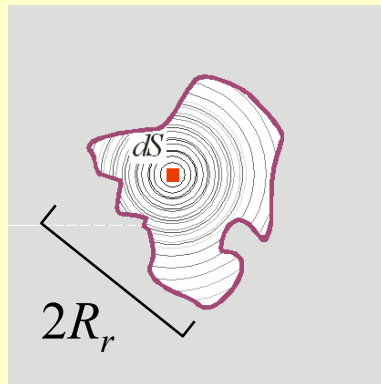


## Разрушение неровности/«asperity» на разломе: объемные волны в дальней зоне



**Случай 1:** бесконечный разлом с неровностью  $dS$

сейсмический момент  
бесконечен



**Случай 2:** конечный разлом с неровностью  $dS$

сейсмический момент  
порядка

$$dM_0 = 2R_r dF$$

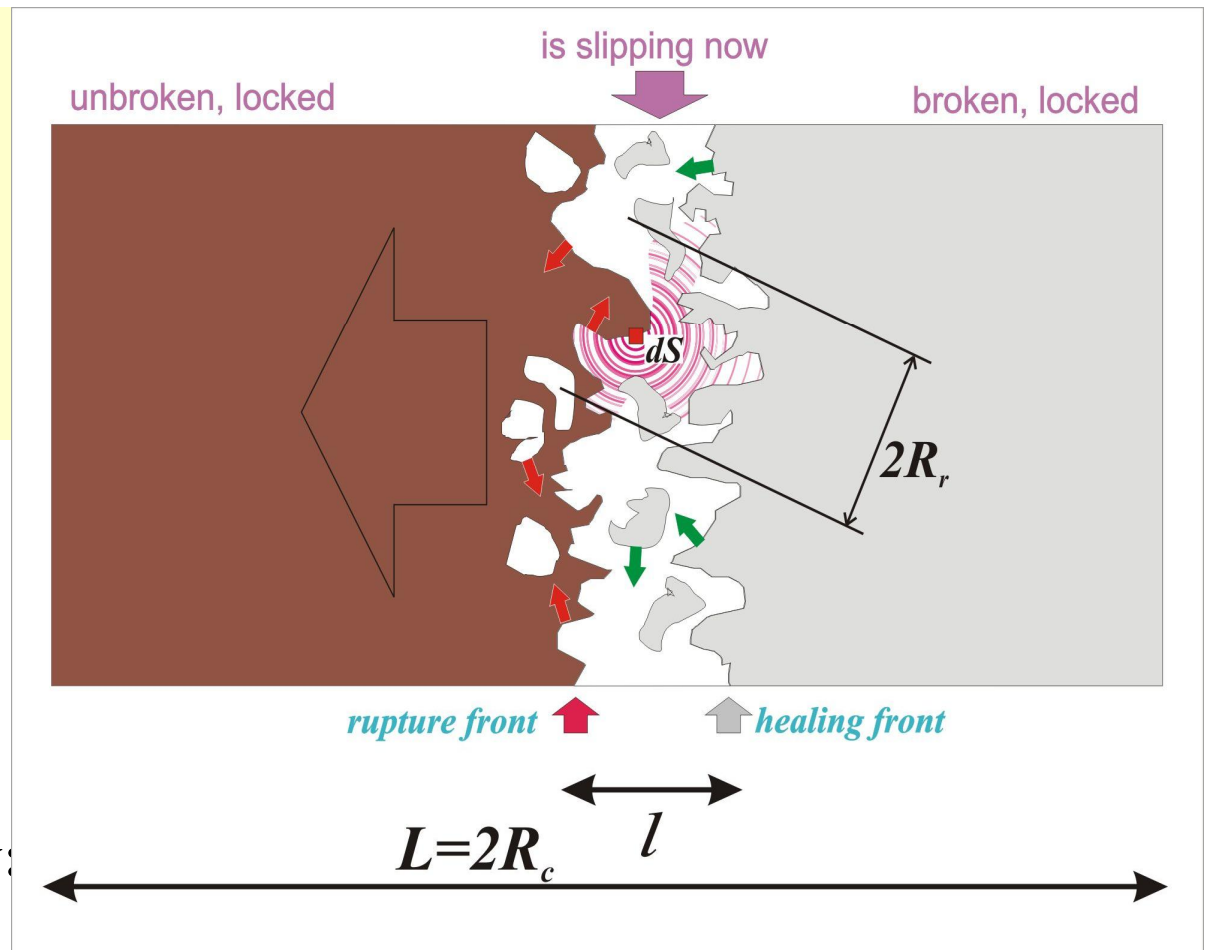
где  $dF$  – **сейсмическая сила**

$$dF = \Delta\sigma(x, y) dS$$

**Ключевая гипотеза  
для применимости  
теории Дас-Кострова:**

**пятно низкого сцепления  
(размером  $2R_r$ )  
можно отождествить  
с куском полосы импульса  
подвижки (шириной  $l$ )  
так что соответствующие  
размеры близки друг к другу:**

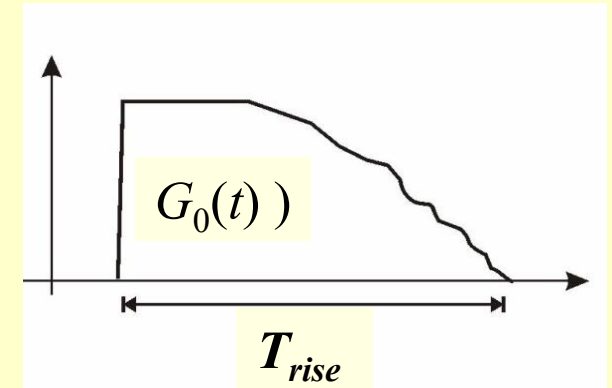
$$2R_r \approx l$$



**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  $SH$**
- **$T_{rise}$**  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

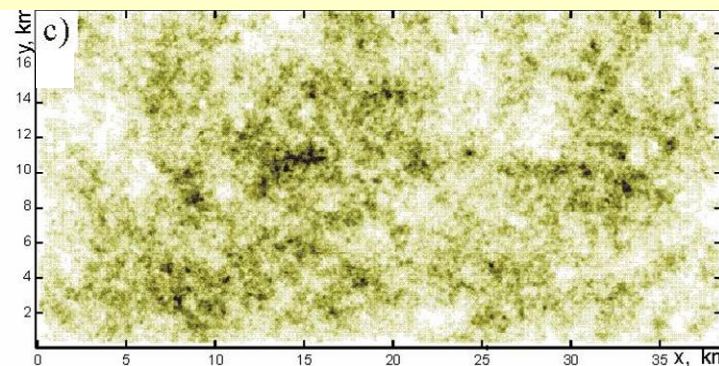
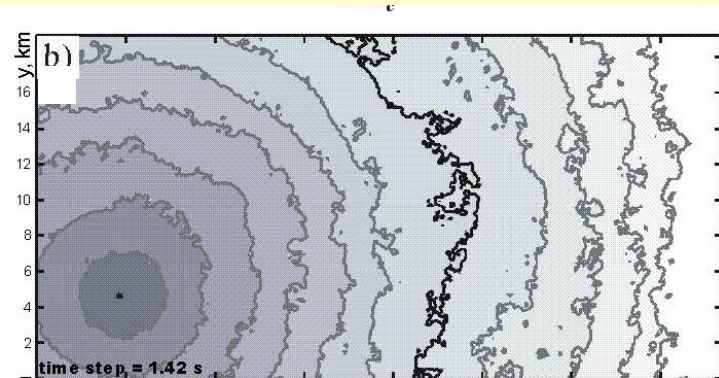
в скобках - принятые значения параметров



- (a) задать прямоугольник-очаг ( $38 \times 19$  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

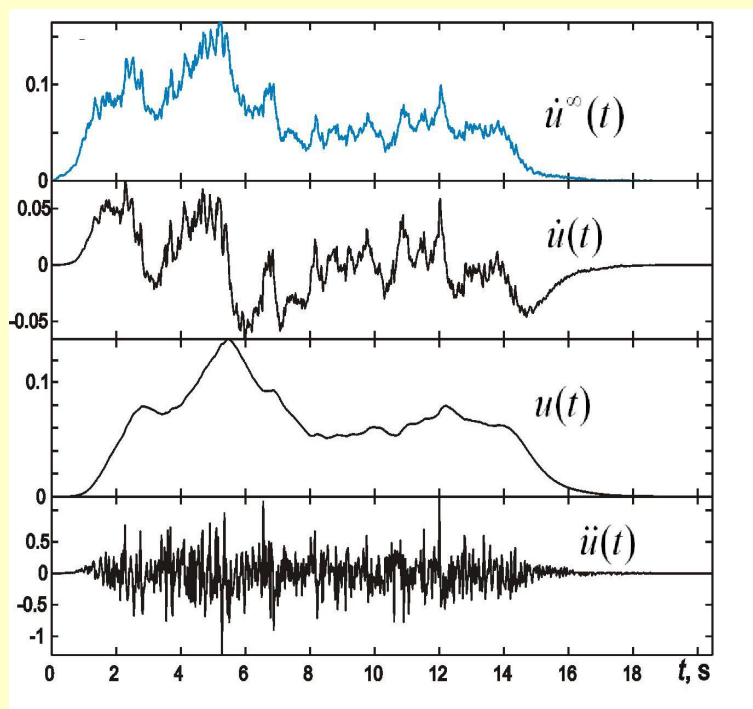
$t_{fr}(x, y)$  и  $\Delta\sigma(x, y)$ ;

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

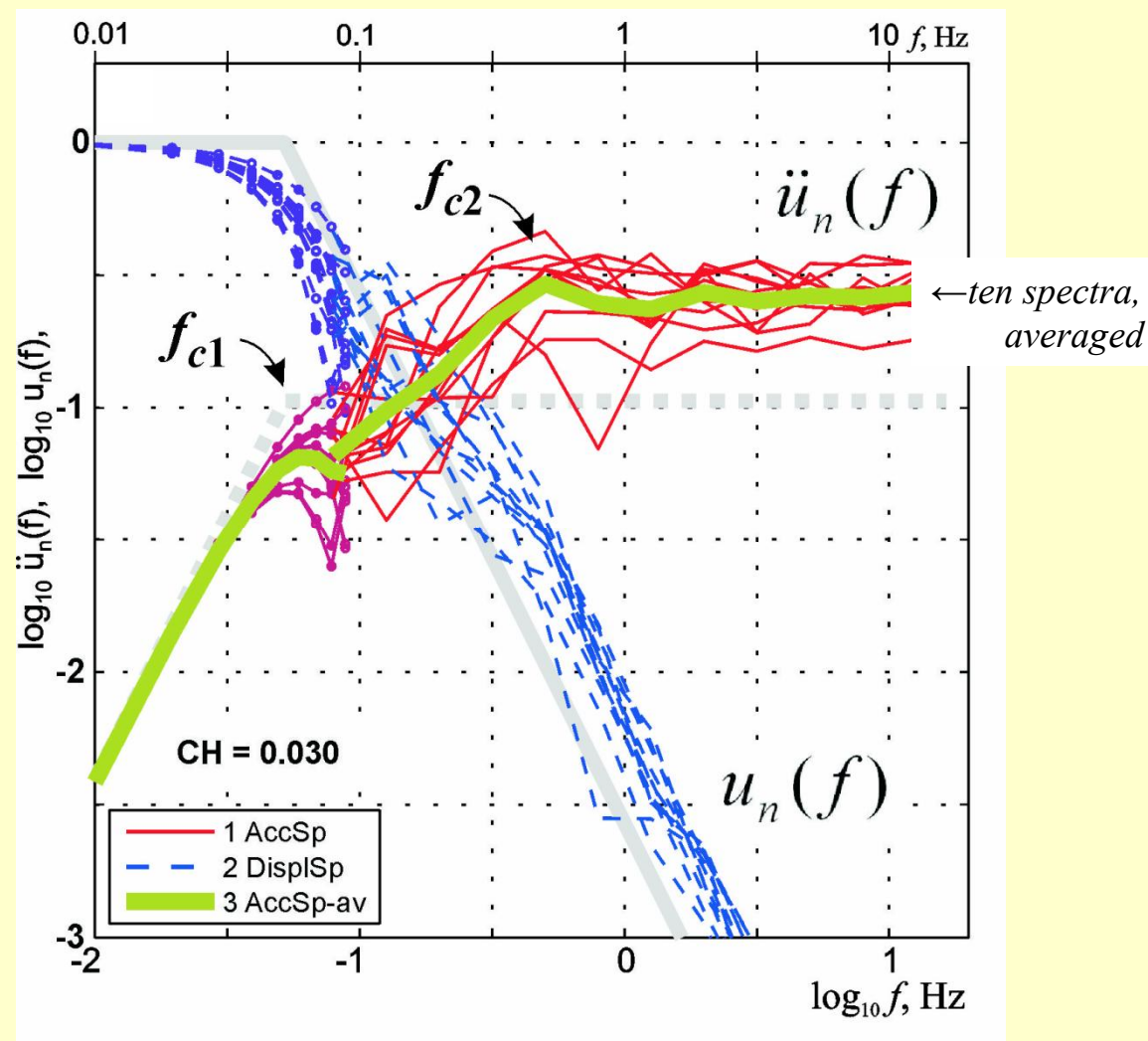




# Моделирование: примеры сигналов и спектров

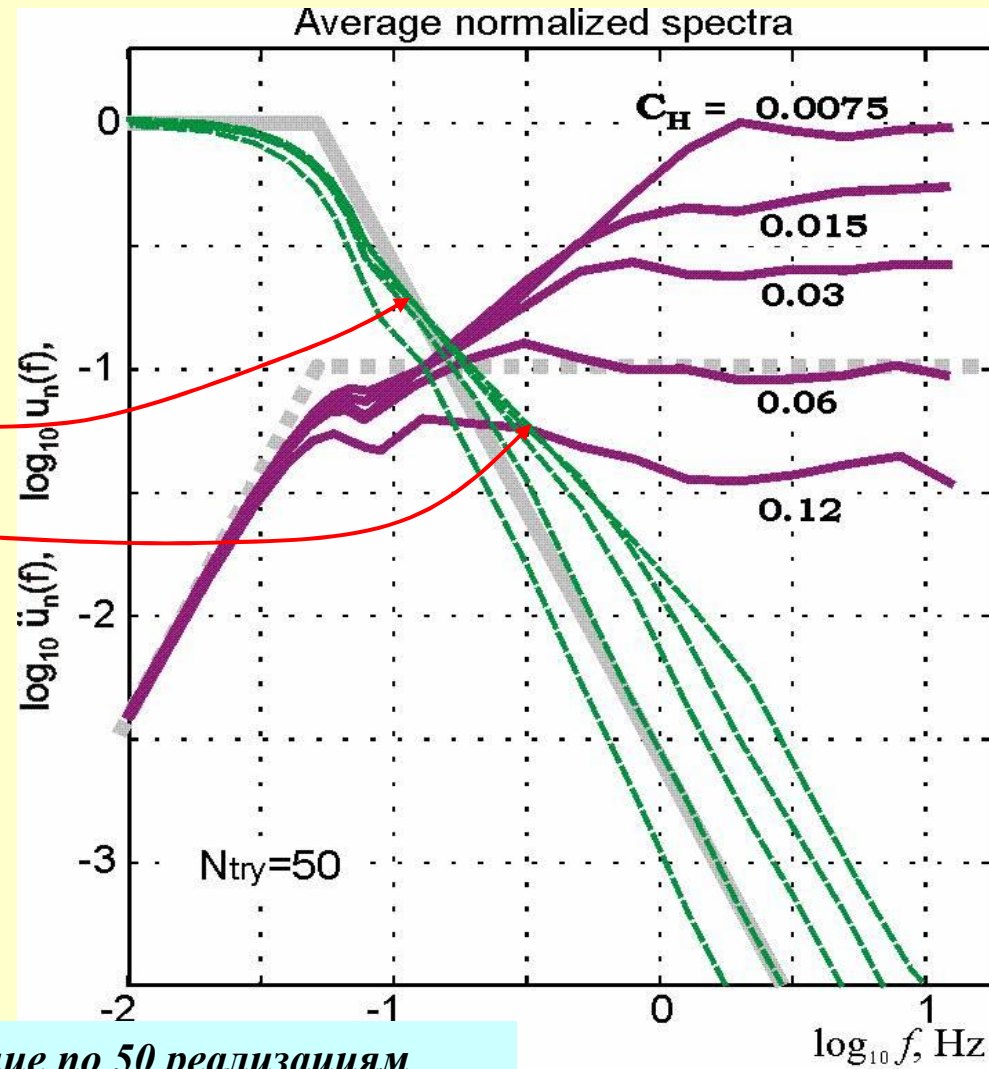


- приемник на луче, нормальном к площадке очага



# Моделирование: как форма спектра зависит от относительной ширины импульса подвижки $C_H = l/L$

“ $\omega^{-1}$ ”  
промежу-  
точный  
наклон



приведены средние по 50 реализациям

с спектры с двумя четкими изломами при  $C_H \leq 0.05$

примерно классическая форма типа «омега-квадрат» при  $C_H \approx 0.06-0.10$

**Вариант масштабирования параметров:  $f_{c2}$  и уровня ВЧ спектра  $A_{HF}$ :**

$$f_{c2}/f_{c1} \approx 0.2/C_H$$

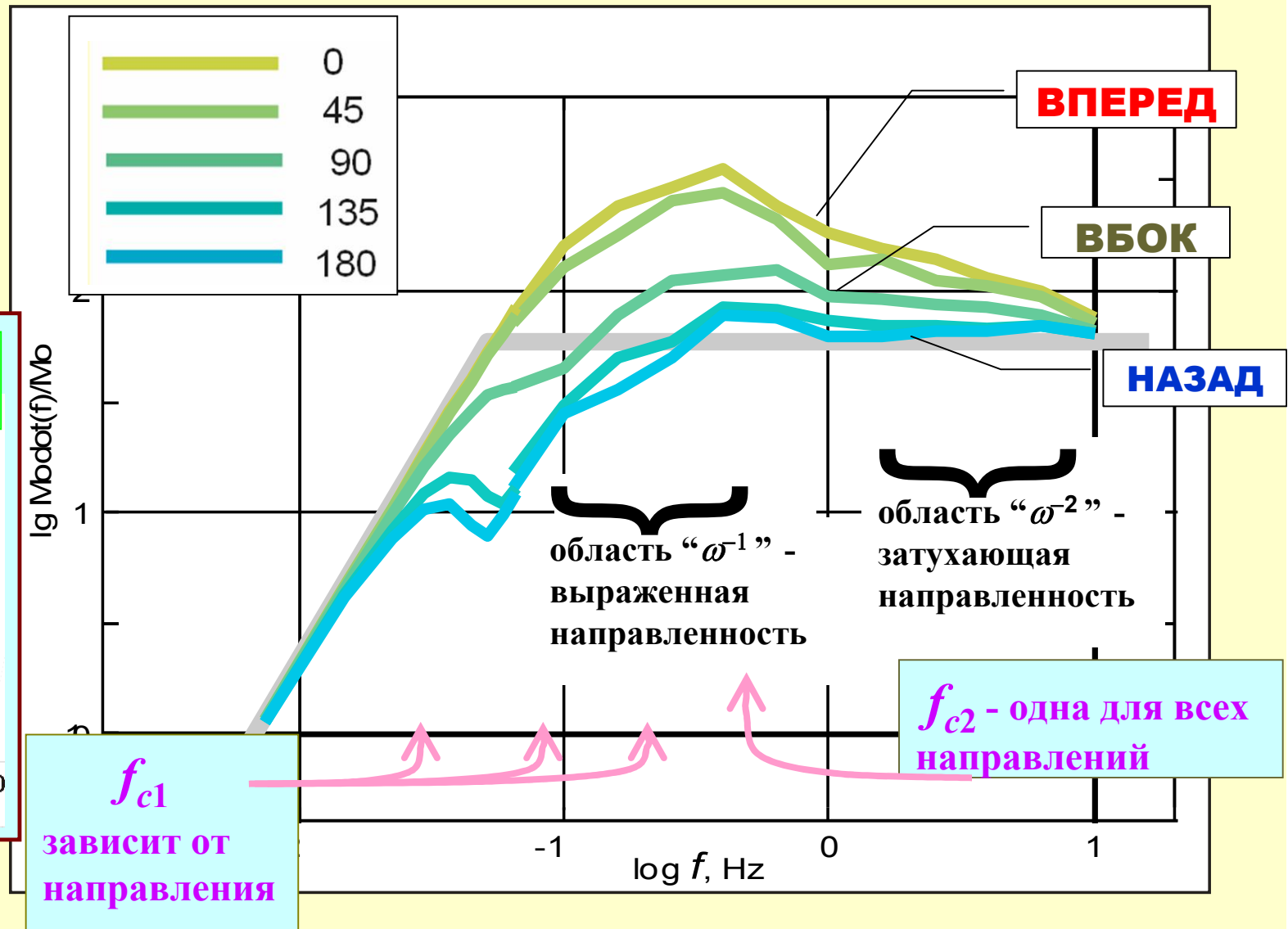
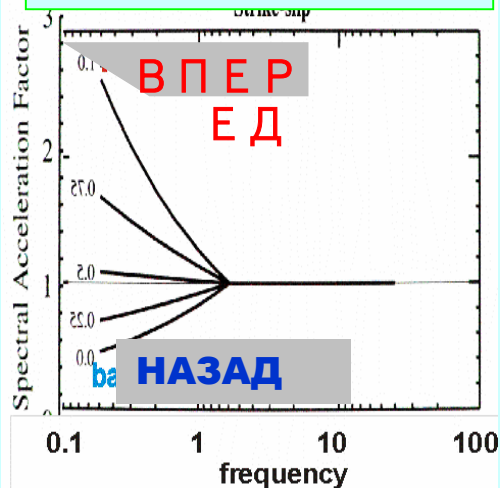
$$A_{HF}/A_{1HF} \approx 0.063/C_H$$

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

$$v_{rup}/c_S = 0.85$$

$$M \approx 6.7-6.9$$

Наблюдения,  $M=6-7$   
Somerville et al 1997, SRL



# 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 adjustments may be needed; both ignored in further simplified simulation

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

