

*А. А. Гусев<sup>1,2</sup>, В. М. Павлов<sup>2</sup>*

**Широкополосное моделирование  
сейсмических колебаний грунта как серии  
импульсов от очага землетрясения с  
заданным очаговым спектром**

*<sup>1</sup>ИВУС ДВО РАН, [gusev@emsd.iks.ru](mailto:gusev@emsd.iks.ru)*

*<sup>2</sup>КФ ГС РАН, [pvm@emsd.iks.ru](mailto:pvm@emsd.iks.ru)*

Большая часть исследований выполнена во время работы авторов в Международном центре  
теоретической физики им. Абдуса Салама (Триест, Италия)  
по приглашению и с поддержкой иностранного члена РАН, проф. Джулиано Панца

**Авторы приносят извинения  
за англоязычные подписи  
на графиках**

# Задача исследования

Разработать процедуру для оценки возможных движений грунта для приложений к инженерной сейсмологии и оценке сейсмической опасности («**hazard** »).

Специфические требования:

- применимость на малых удалениях от разлома-очага
- широкая полоса частот (0,03-25 Гц)

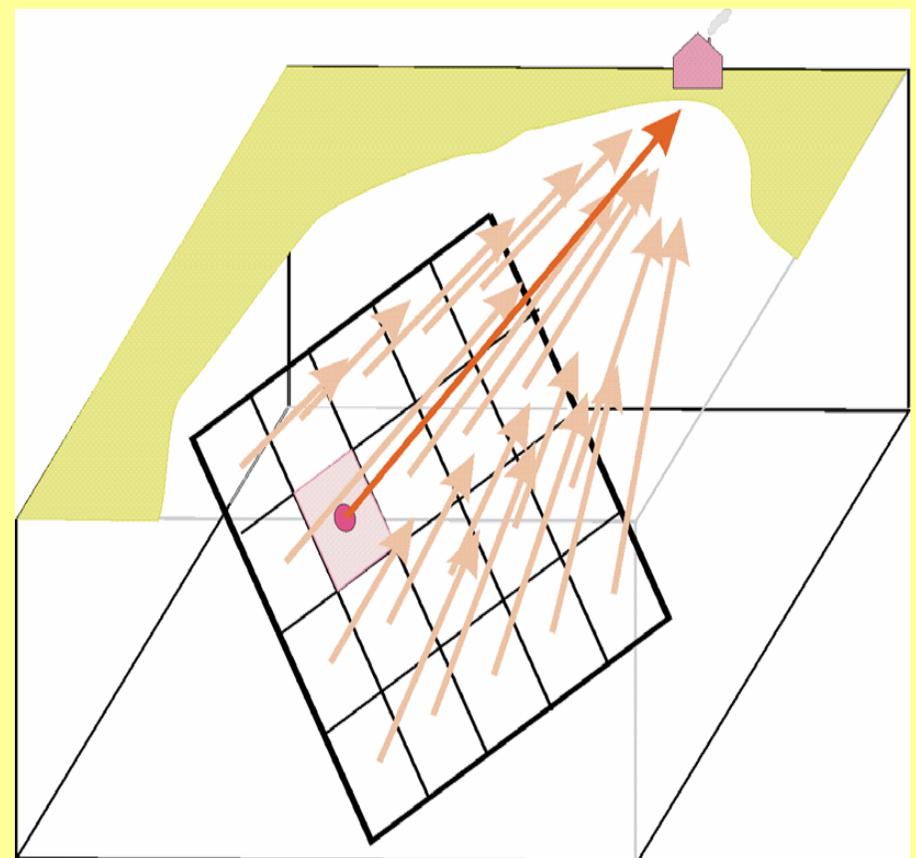
Ограничение: - для скальных грунтов

## Общий подход

(обычный в данной задаче)

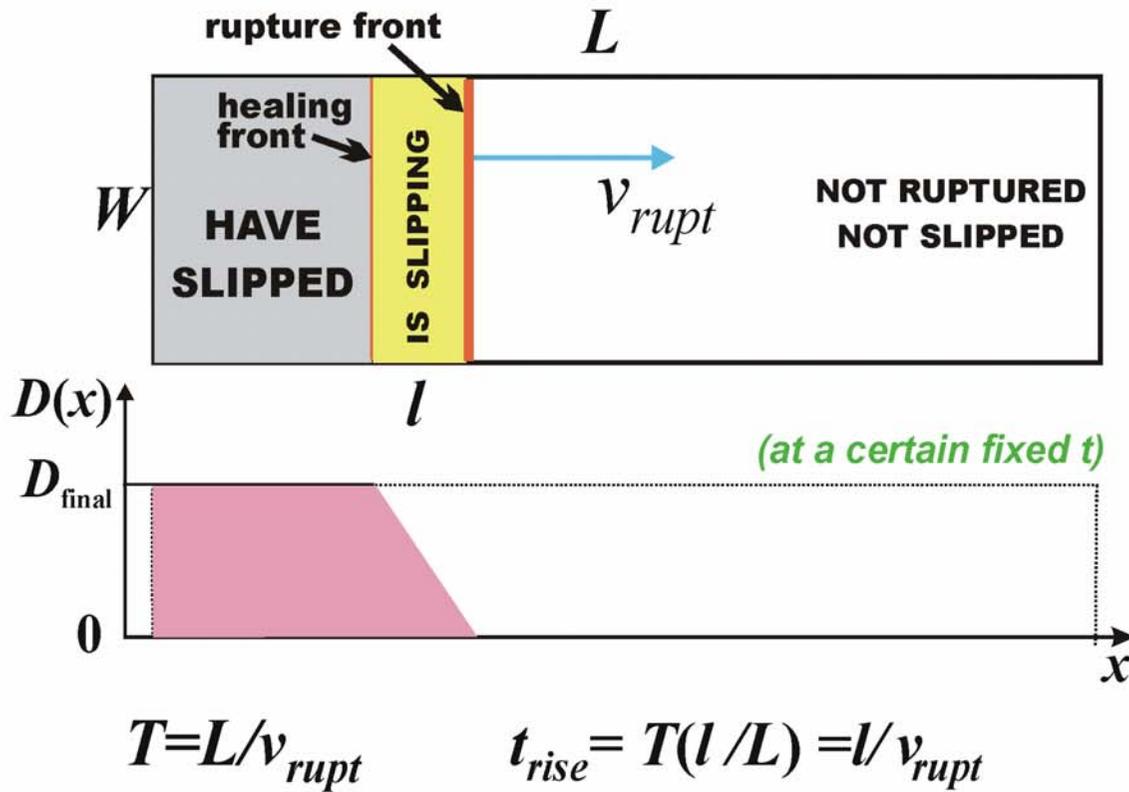
Использовать двумерную сетку точечных источников с заданными временными историями

Эффект источника описывать через точные теоретические функции Грина для слоистого полупространства, пригодные во всей рабочей полосе частот.



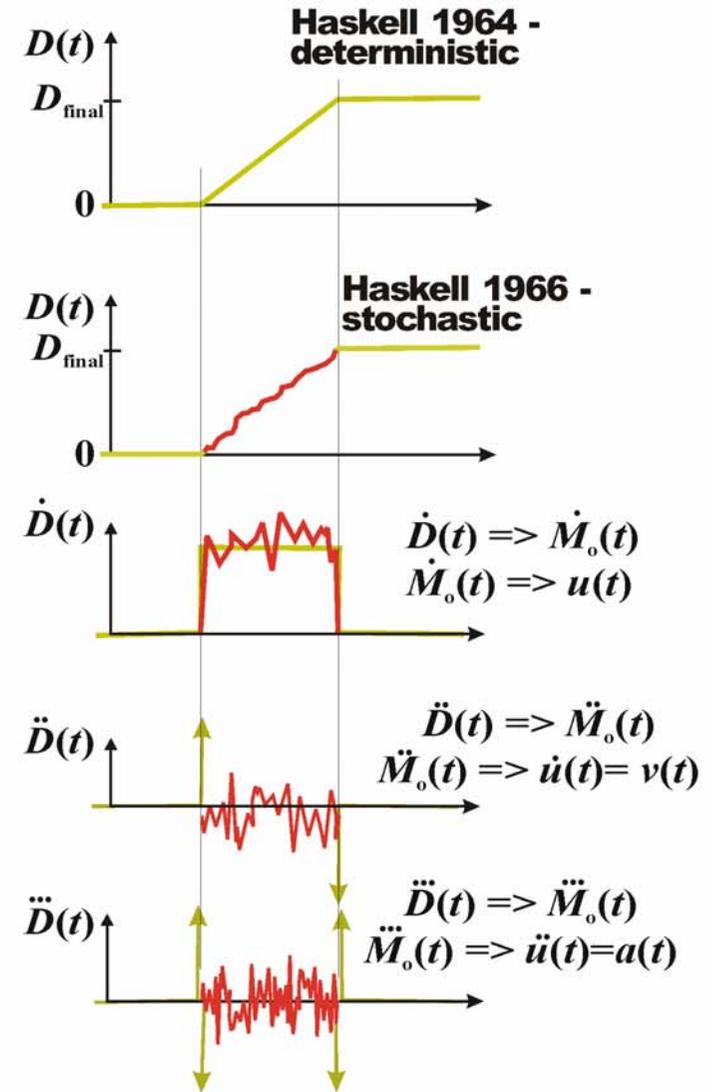
Базовая модель очага: по Хаскеллу-Аки-Хитону:  
бегающая дислокация конечной ширины

EQ Source/Fault model of Haskell 1964, 1966



Heaton's(1990) parameter:  $C_H = l/L = t_{rise}/T$   
 $C_H = 1/20 - 1/5$ , typically  $1/10$

(at a certain, fixed  $x$ )



## Принципы моделирования очага:

Кинематическая модель очага Хаскелла обобщается по следующим линиям:

- (A1) **Результирующая подвижка** - не константа, а переменная - двумерная **случайная функция**
- (A2) **Скорость распространения разрыва** - не константа, а переменная - **случайная функция**
- (A3) **Зарождение разрыва** возможно в **произвольной** точке площадки очага  
(Локальное **время нарастания подвижки** («rise time») принято постоянным)
- (B) Сетка точечных субисточников выбирается достаточно плотной, согласуясь с расстоянием: размер ячейки существенно меньше чем расстояние от разлома до площадки/приемника
- (C) **История нарастания подвижки** в каждом субисточнике- **случайная функция**. Между такими функциями для разных субисточников корреляция отсутствует

# Процедура моделирования

## А. Предварительный этап -выбор параметров (1)

**Обычные сейсмологические параметры:**

**сейсмический момент**  $M_0$ ;

**сброшенное напряжение**,  
задается как лог-отклонение от  
регионального среднего:  
 $\delta = \delta \log \Delta \sigma = \log(\Delta \sigma / \Delta \sigma_{\text{average}})$ ;

**углы падения, простирания и  
скоса** = нодальные плоскости =  
«механизм очага»

**положение центра площадки  
очага**

( $\approx$  "макросейсмический гипоцентр");

длина  $L$  и ширина  $W$   
прямоугольного разлома-очага

**время нарастания подвижки**

положение **точки зарождения  
разрыва / гипоцентра**

**средняя по очагу скорость  
распространения разрыва**

**Параметры, задающие свойства  
случайных функций:**

- для функции результирующей  
подвижки:

• **закон распределения**

• **наклон спектра**

• **параметр двумерной функции окна**

- для функций локальной истории  
подвижки:

• **закон распределения белого шума**

• **параметр функции окна**

(=вид огибающей)

- для локальных/мгновенных значений  
скорости распространения разрыва:

**закон распределения**

# Процедура моделирования

## А. Предварительный этап -выбор параметров (2)

**“очаговый спектр” =**

**амплитудный спектр Фурье от функции скорости изменения сейсмического момента эквивалентного точечного источника (величины двойного силового диполя)**

[определяет сигнал смещения в объемной сейсмической волне в дальней зоне]

определяется на основе (эмпирического) **регионального закона масштабирования очаговых спектров (scaling law of source spectrum)**

для заданной комбинации  $[M_0; \Delta\sigma]$

**параметры слоистой среды**

упругие

неупругие (Q)

# Процедура моделирования

## В. Моделирование результирующей подвижки (1)

Результирующая подвижка на площадке очага рассматривается как реализация **изотропного самоподобного двумерного случайного поля**

Это случайное поле задается своим двумерным спектром мощности, который в этом случае является степенной функцией от  $|k|$ :

$$P'(k_x, k_y) = P(k) = \text{const} \cdot k^{-p}$$

[Типовое значение для  $p$ :  **$p=1.75$** ]

Для порождения реалистического распределения подвижки по площадке очага конечного размера, сгенерированная модельная реализация для однородного поля умножается на двумерную функцию окна («шапочку»)  $C(x, y)$ :

$$C(x, y) = f(x/L)g(y/W) = f(u)g(w) = (u(1-u))^\gamma (w(1-w))^\gamma$$

# Процедура моделирования

## В. Моделирование результирующей подвижки (2)

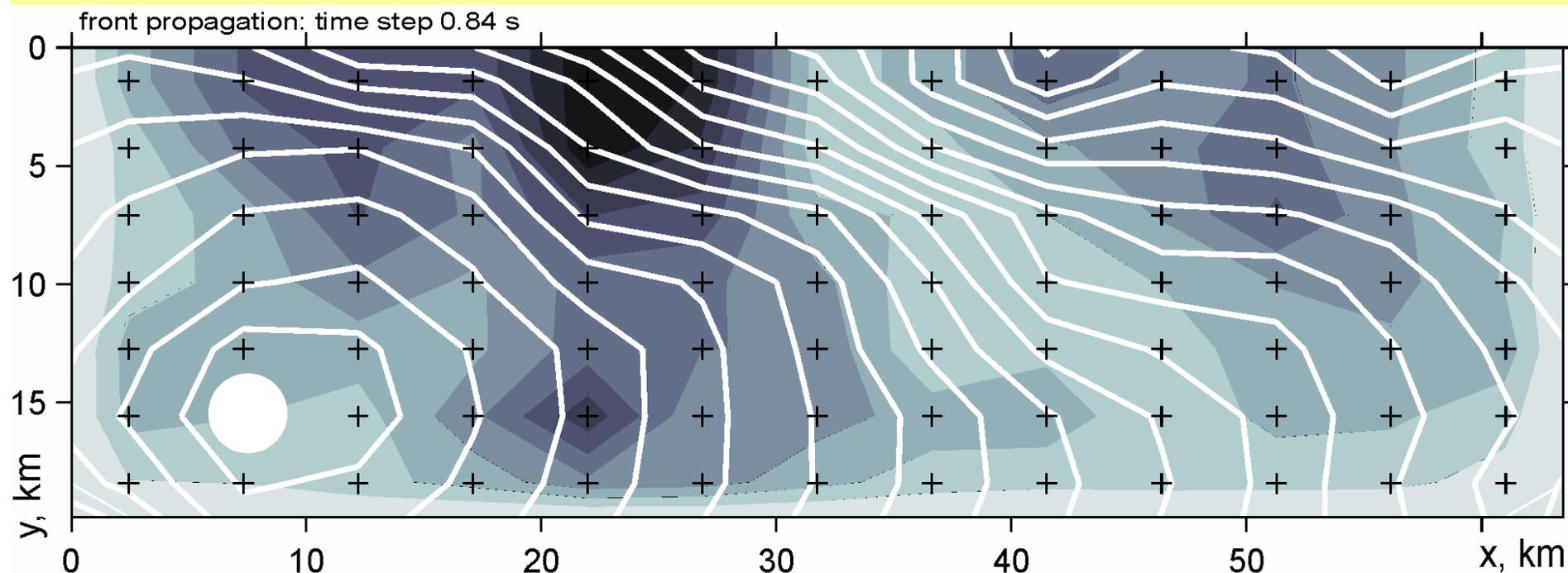
Предполагается, что **закон распределения** для случайных значений подвижки в точке - тяжелохвостый. Для практического моделирования использован **логнормальный закон**.

Используя логнормальный закон, мы легко моделируем такие варианты распределения подвижки:

- детерминистский (неслучайный)
- почти гауссов
- выраженно негауссов - тяжелохвостый  
(он необходим для моделирования систематически выявляемых локальных пятен с большой подвижкой - «asperity»)

# Пример моделирования результирующей подвижки

Градации серого: амплитуды подвижки  
Белый кружок: гипоцентр  
Белые контуры: последовательные положения фронта разрыва  
+ субисточники



$M_w=7.2$ ,  $L = 63$  km,  $W=20$  km. Сетка субисточников  $13 \times 7$ .

Верхняя кромка очага предположительно выходит на поверхность, функция окна к ней не применена

# Процедура моделирования

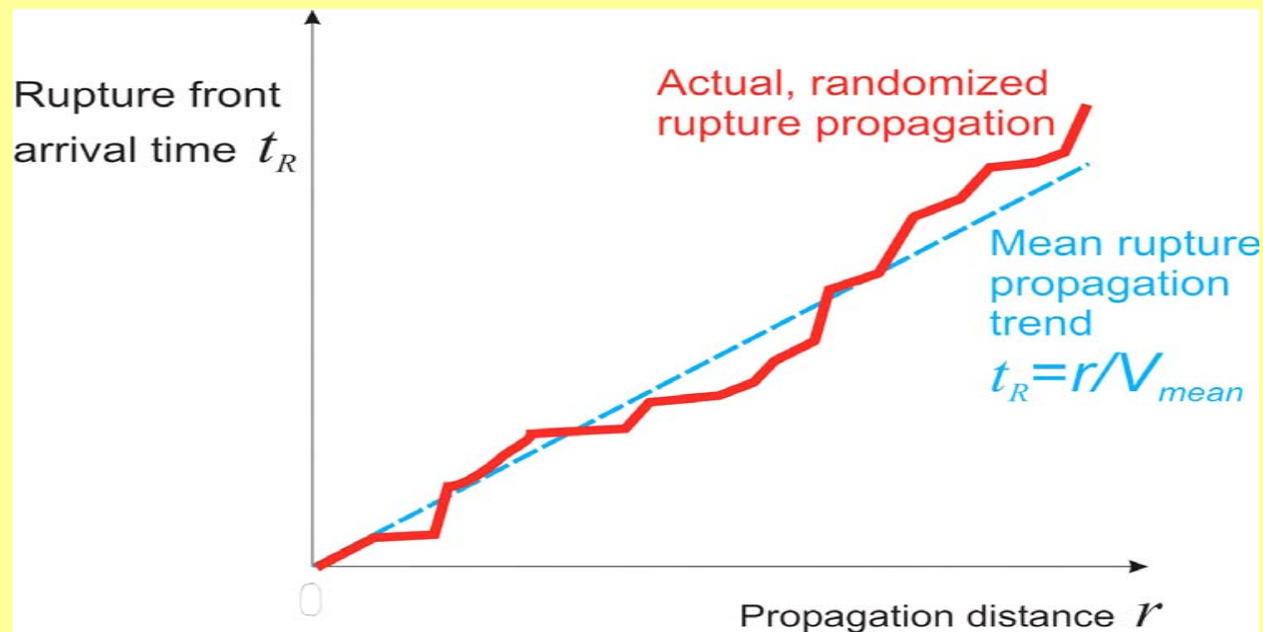
## С. Моделирование истории распространения разрыва

Скорость распространения разрыва: переменная, случайно изменяется во времени, при заданном среднем значении по очагу; это среднее также может случайно меняться от одного варианта очага к другому.

Разрыв не приостанавливается; неразорванных барьеров не возникает.

Модель 1: Круговые фронты, скорость варьирует вдоль радиуса

Модель 2: Искривленные фронты, определяются заранее заданным двумерным случайным полем скорости (модуль в работе)



## Процедура моделирования

### D. Моделирование временного хода локальной подвижки для субисточника (1)

Для каждого субисточника, временной ход скорости подвижки представляется как реализация **нестационарного случайного шума**. Шум генерируется в два шага:

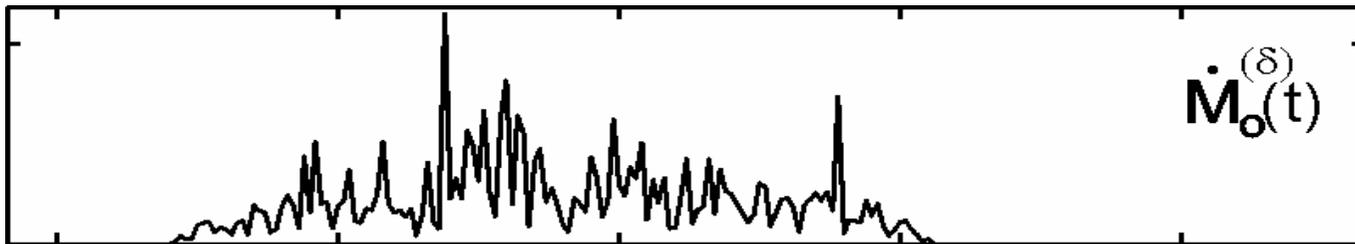
Шаг 1. Генерация приблизительно **белого** шума, для которого формируется реалистическим образом:

- форма огибающей** (прямоугольная, симметричное окно,  $t \exp(-t)$  и др.);
- длительность** (уже определена через время нарастания подвижки);
- закон распределения амплитуд** (снова принят логнормальным)

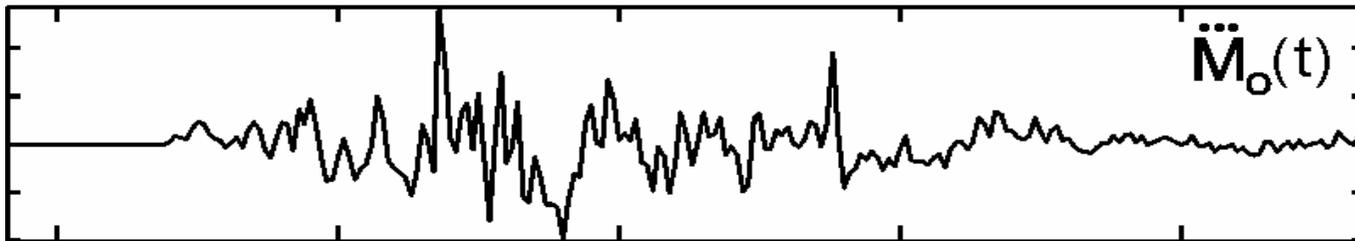
Шаг 2. «**Окрашивание**» шума таким образом, чтобы обеспечить заданную реалистическую форму очагового спектра *для очага в целом*.

Для этого проводится свертка сигнала каждого субисточника со специально подобранным импульсом; его спектр этого импульса представляет собой передаточную функцию, подобранную так, чтобы обеспечить необходимое окрашивание.

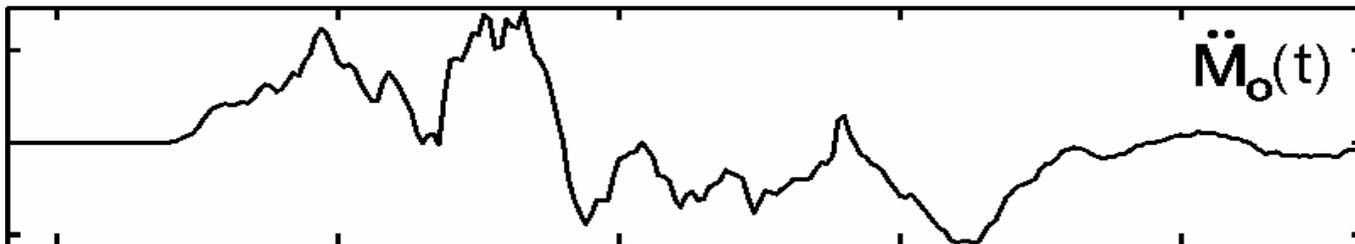
## Пример модельного временного хода субисточника



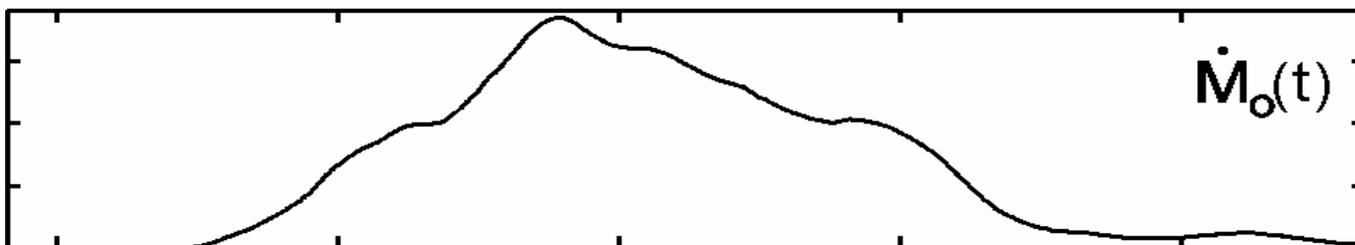
“белый шум”  
(положительный, с  
заданной  
огибающей)



“ускорение”



“скорость”

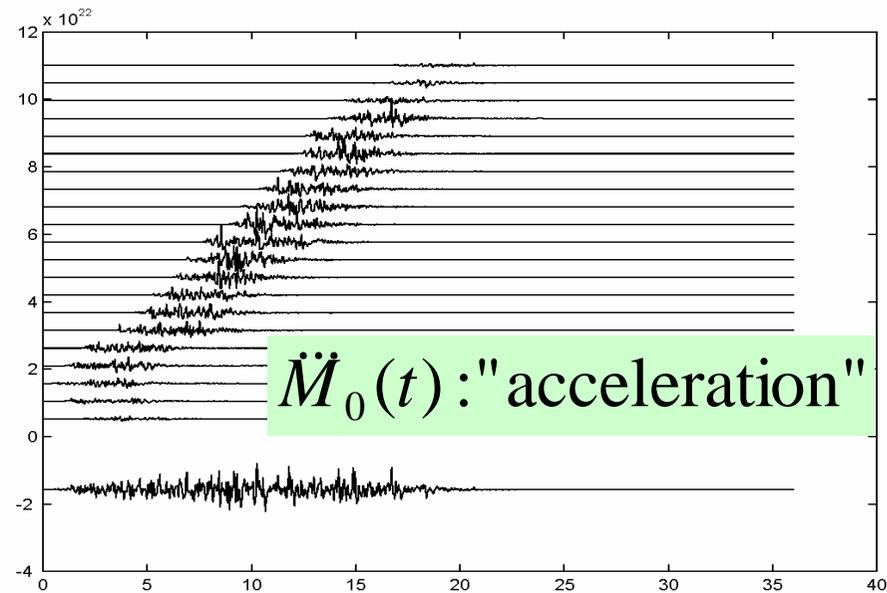
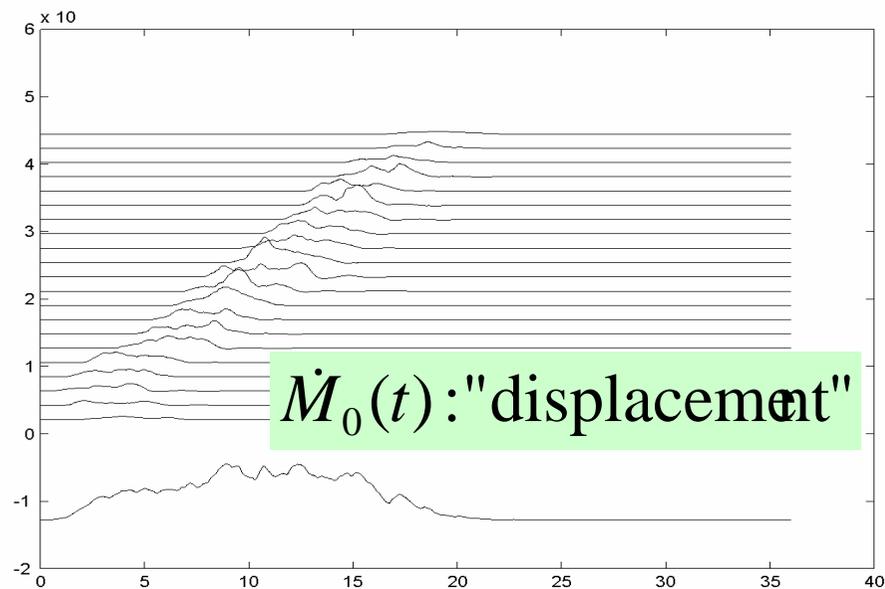
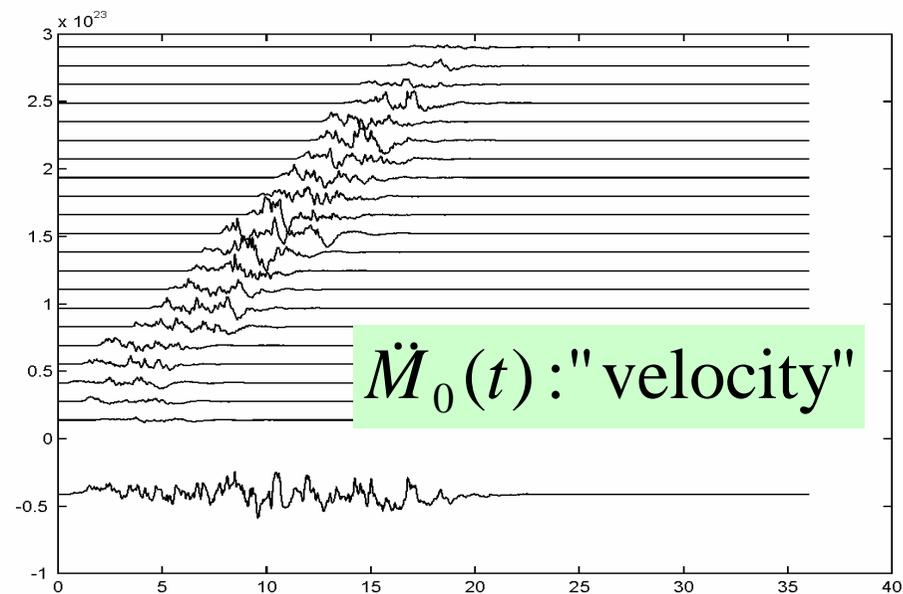
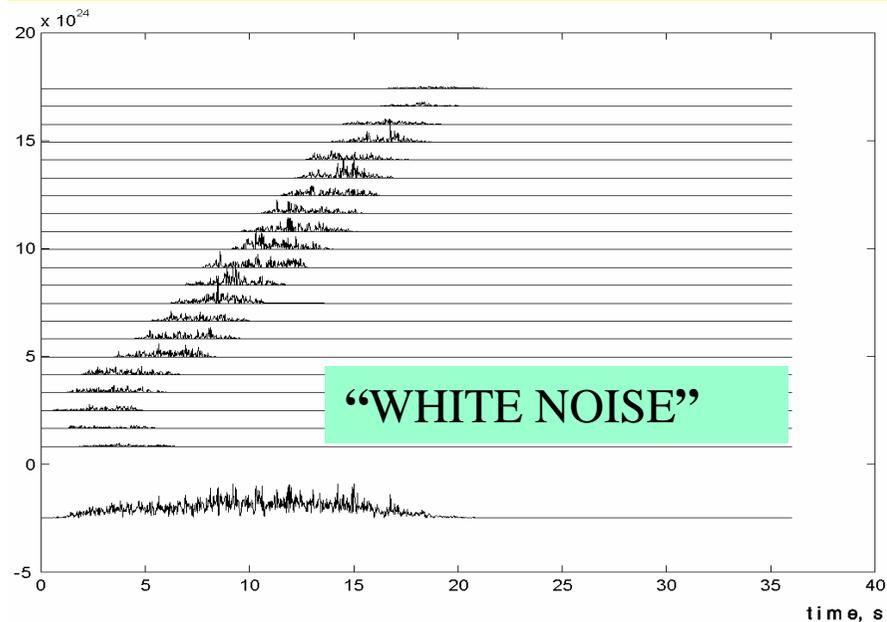


“смещение”  
(скорость изменения  
сейсмического  
момента)

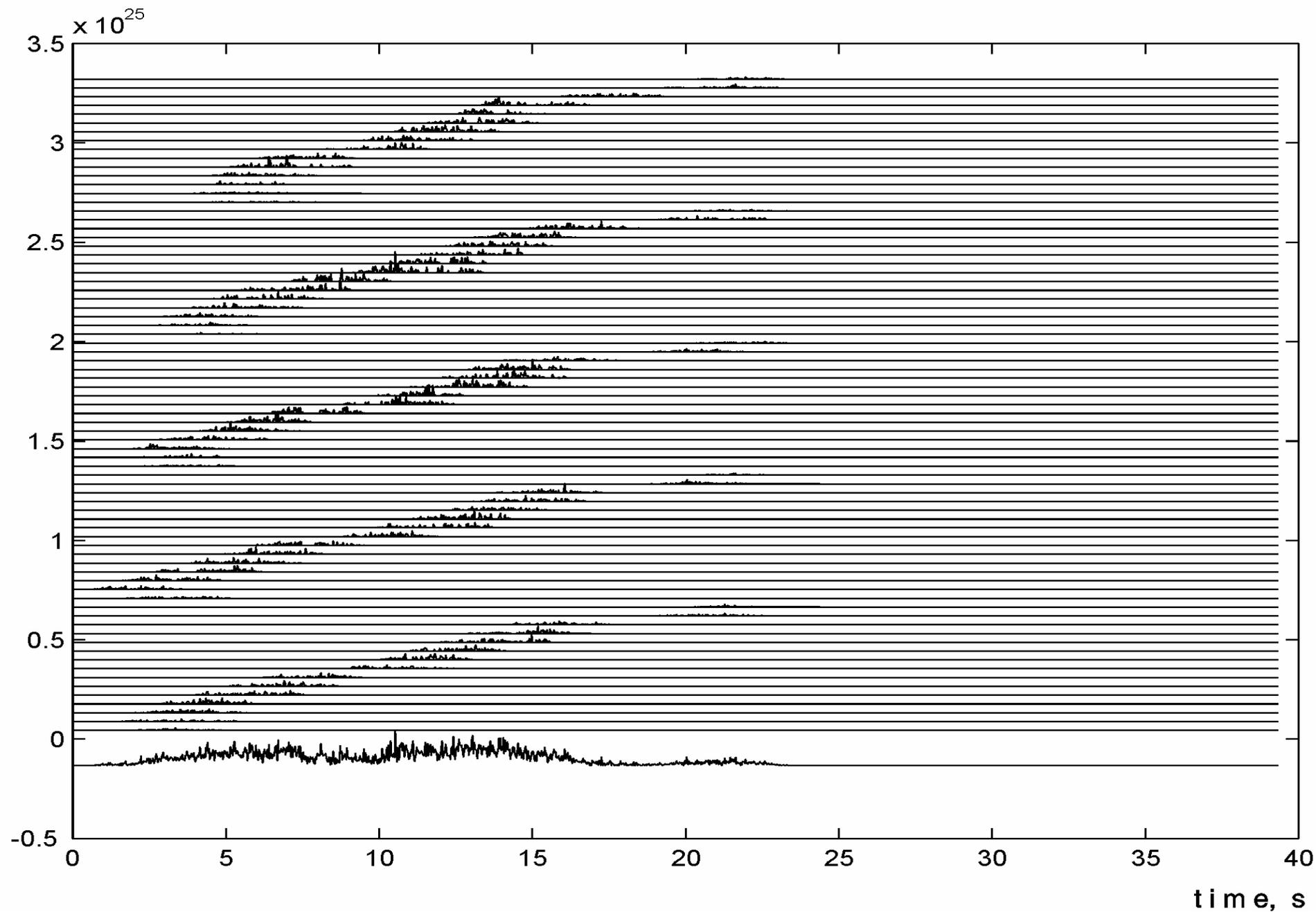
7 8 9 10 time, s

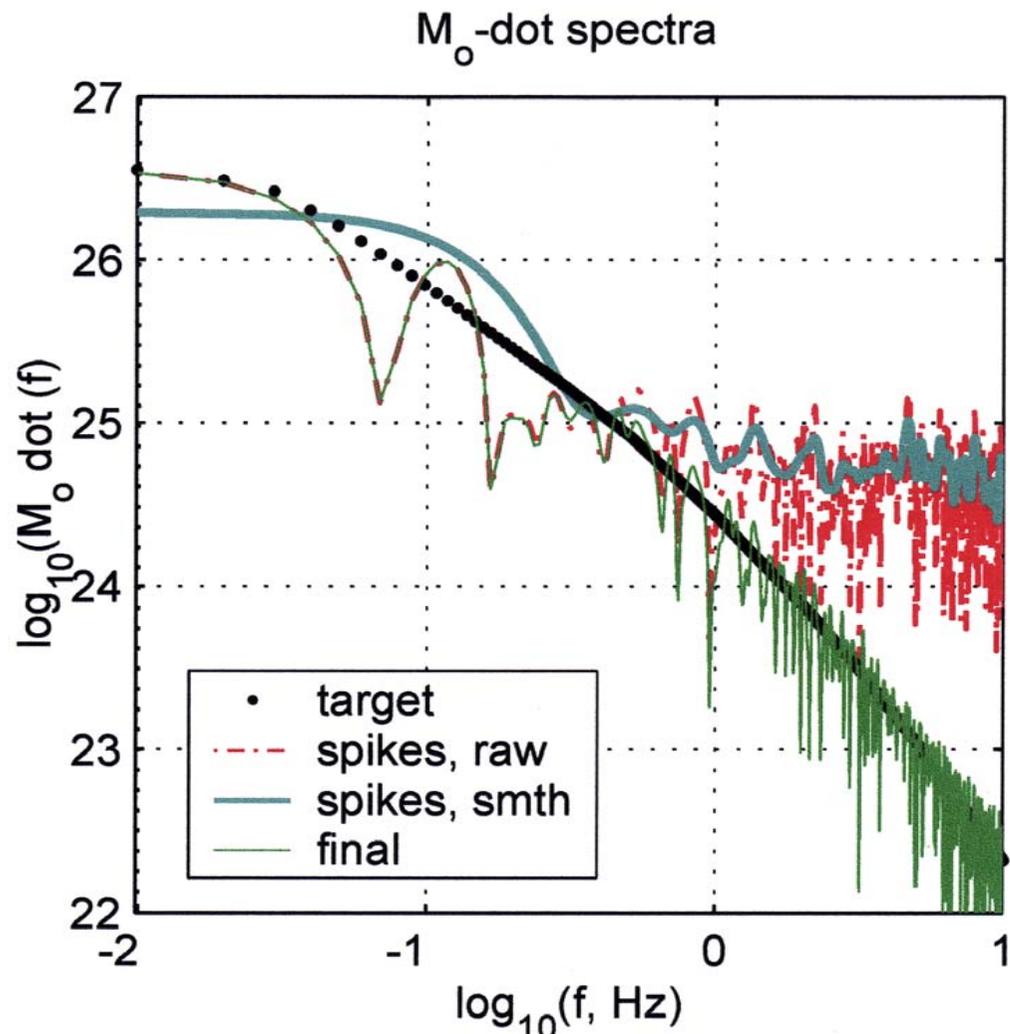
Длительность функции окна  $2 \cdot (\text{время нарастания}) = 3.8$  s.

# Временной ход 21 субисточника для линейной модели очага (сетка 21x1)

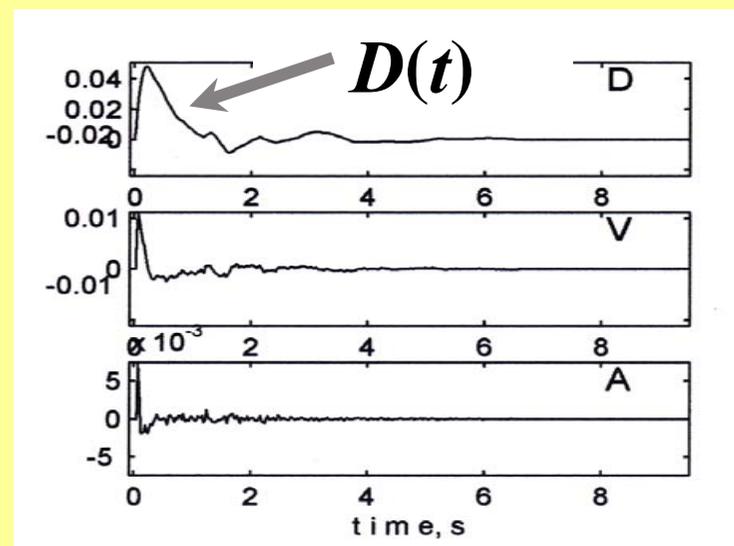


Временной ход субисточников («белый шум») для очага с сеткой субисточников 15x5





Как модифицируется первое приближение моделируемого очагового спектра (на основе белого шума), чтобы добиться согласия с заданным целевым очаговым спектром

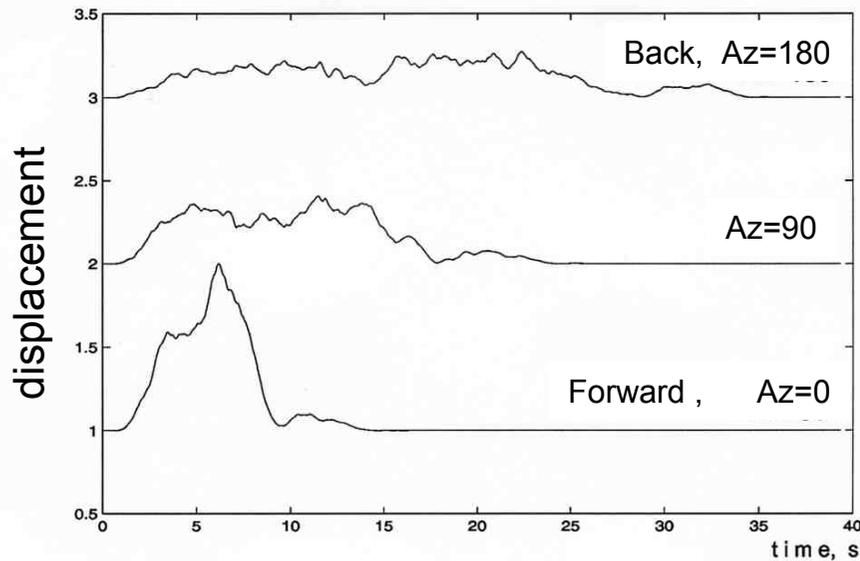


Первое приближения очага (**красный спектр**) модифицируется путем свертки временного хода каждого субисточника с корректирующим импульсом ( $D(t)$ , справа) с единичной площадью.

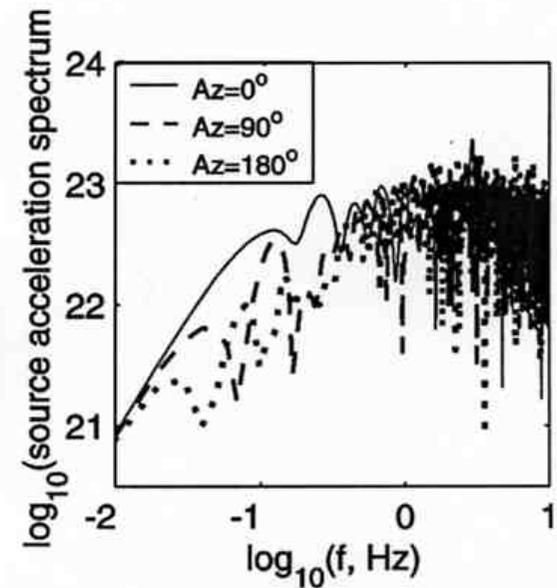
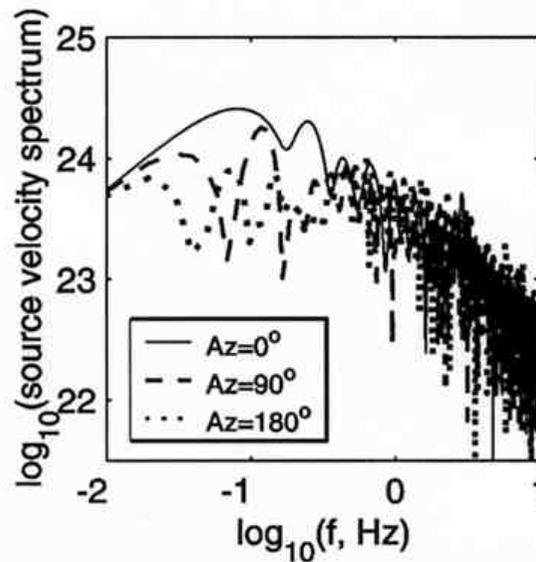
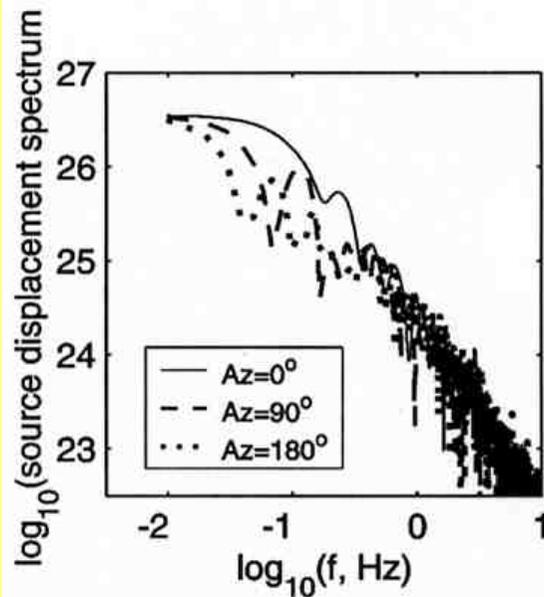
Корректирующий импульс формируется на основе отношения сглаженного спектра 1-го приближения (**серый**) и целевого спектра (**черный**).

Результат свертки (**зеленый спектр**) согласуется с целевым спектром (**черный**).

## Иллюстрация направленности излучения очага: временная и спектральная область



направленность:  
**четко выражена** -  
на **низких частотах**,  
и **слабо проявлена** -  
на **высоких частотах**,  
в согласии с наблюдениями



## Модуль расчета функций Грина

Импульсная реакция слоистой упругой среды рассчитывается с помощью нового улучшенного алгоритма, созданного на основе результатов Алексеева и Михайленко (1980) и Фатьянова и Михайленко (1988)

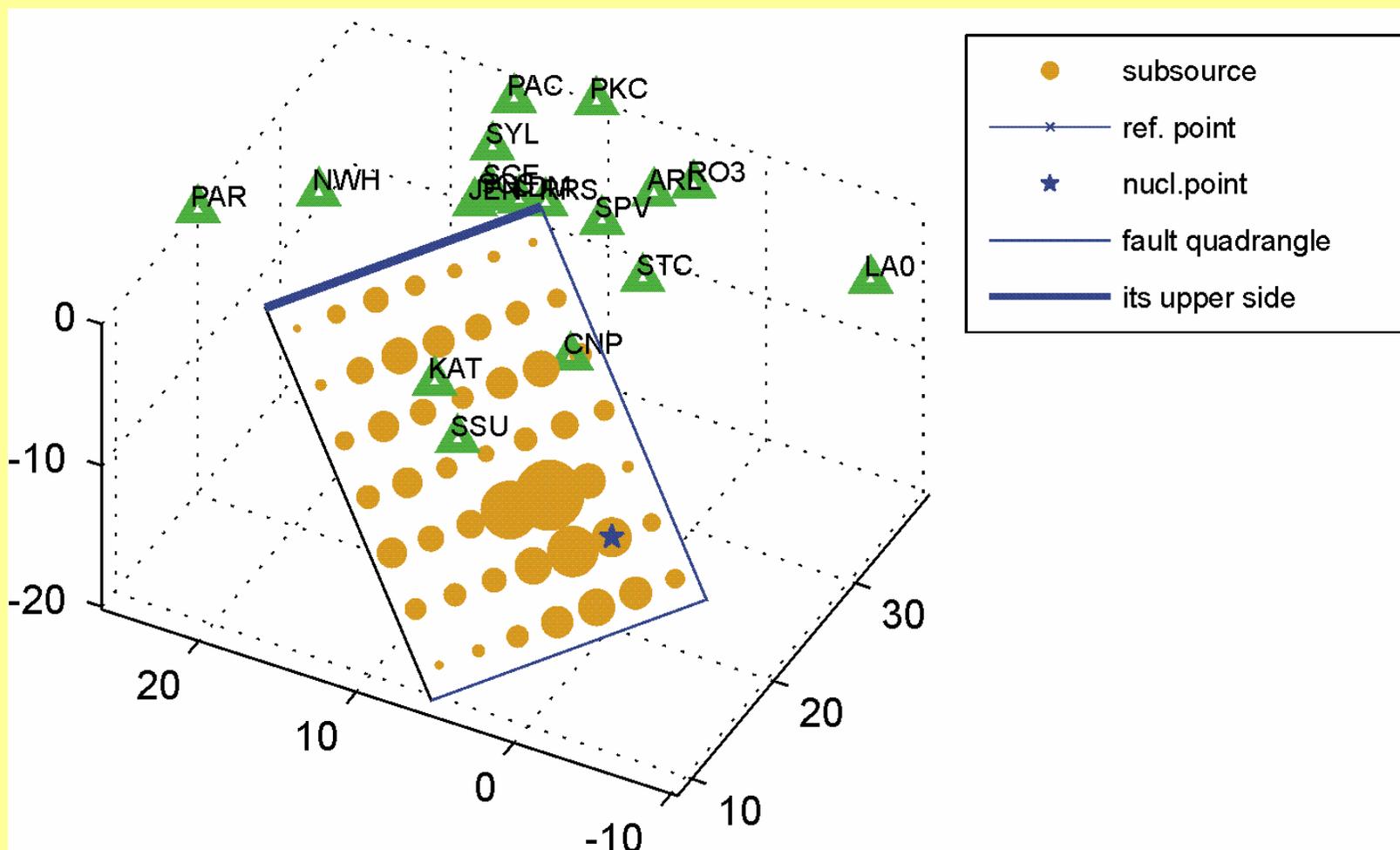
Алексеев и Михайленко (1980), введя искусственную удаленную границу, смогли преобразовать обычное интегральное разложение в ряд по дискретным волновым числам, которые являются корнями определенного уравнения, связанного с функциями Бесселя.

Фатьянова и Михайленко(1988) ввели «вспомогательные функции», которые позволяют эффективно решать возникающие дифференциальные уравнения, поскольку полностью обходится хорошо известная проблема потери точности.

Развитый численный метод дает точное представление движений слоистой упругой (и вязкоупругой) среды в широкой полосе частот, от статических членов до высоких частот

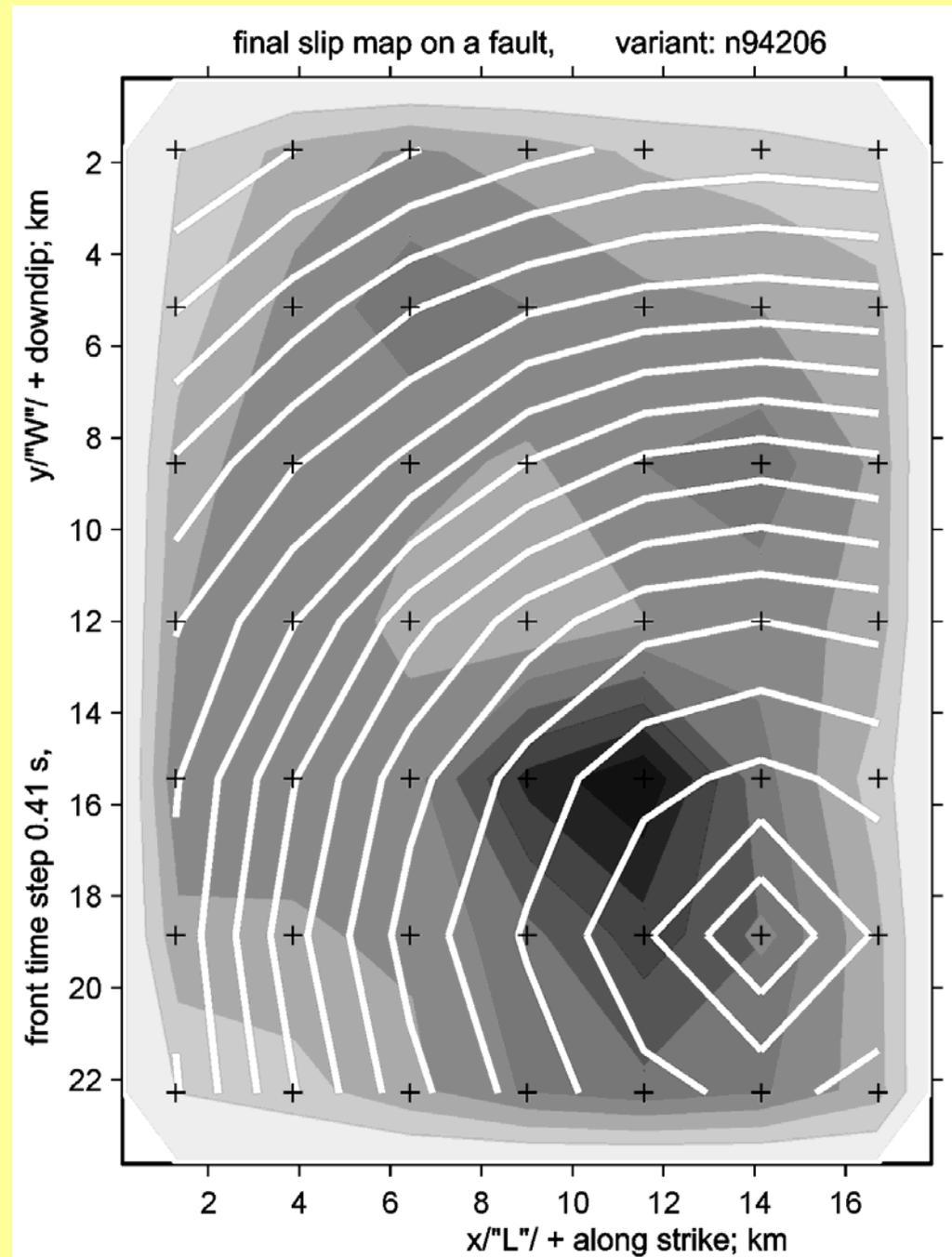
# Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

## Общий вид

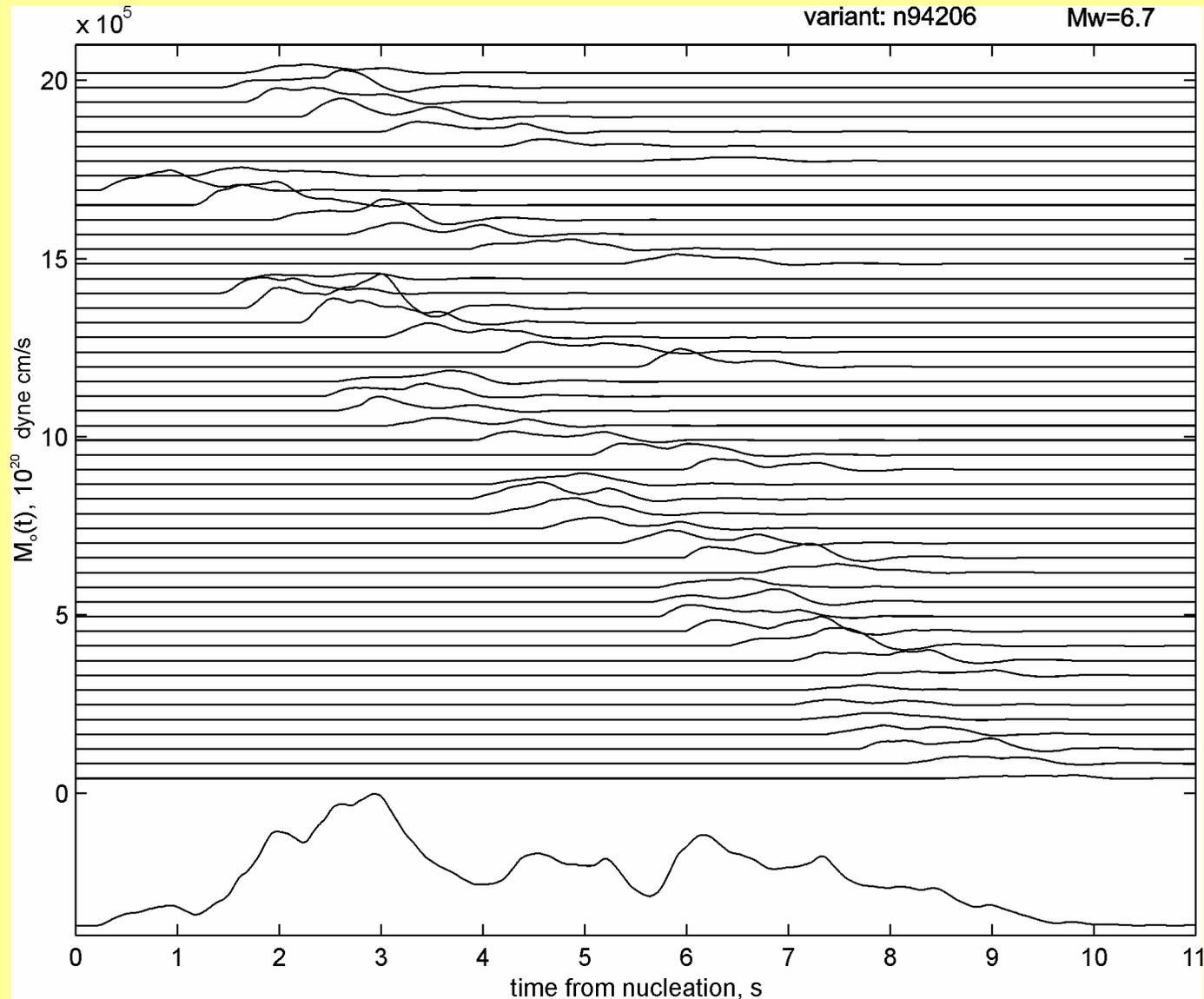


Тестовый пример:  
землетрясение  
Нортридж 1994

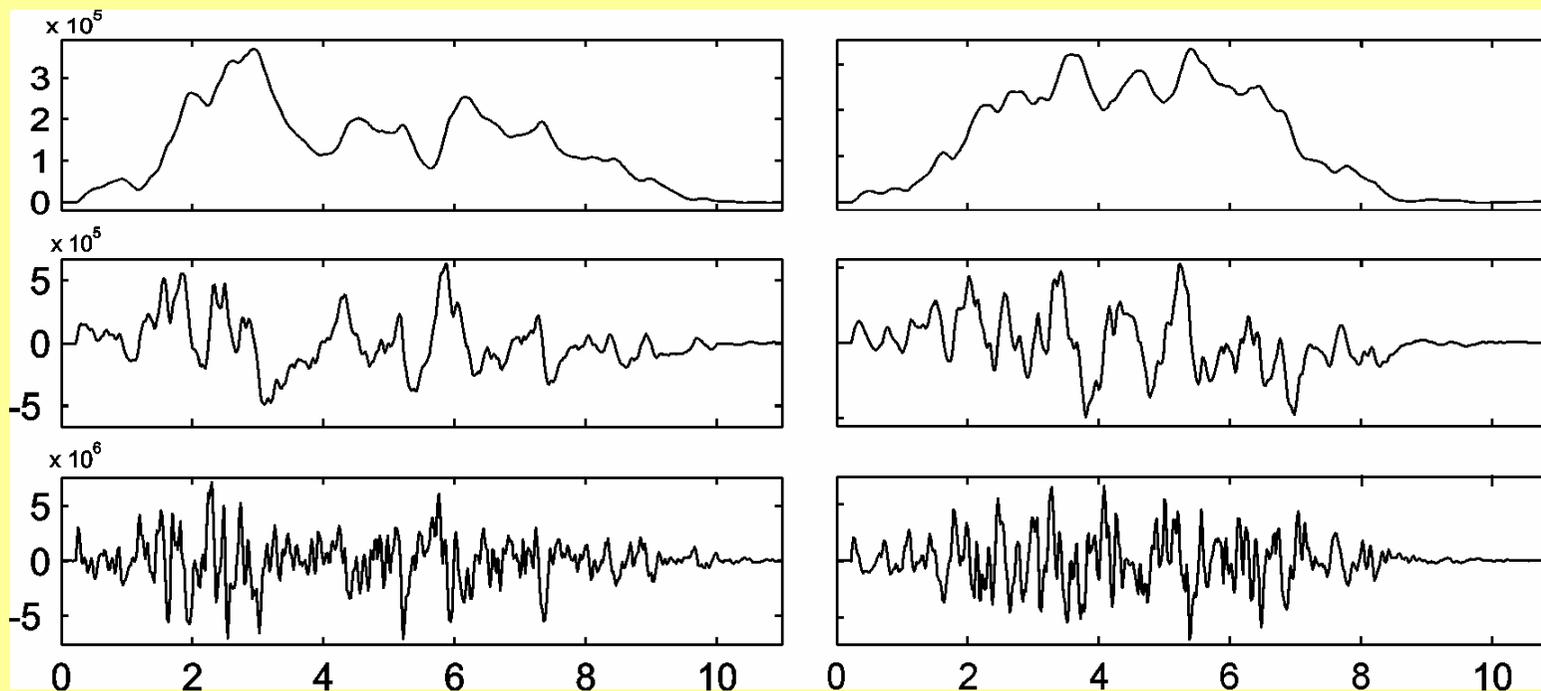
Модельная  
результатирующая  
подвижка в очаге  
Вариант 206



Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994  
Временной ход смещения для 49 субисточников. Вариант 206

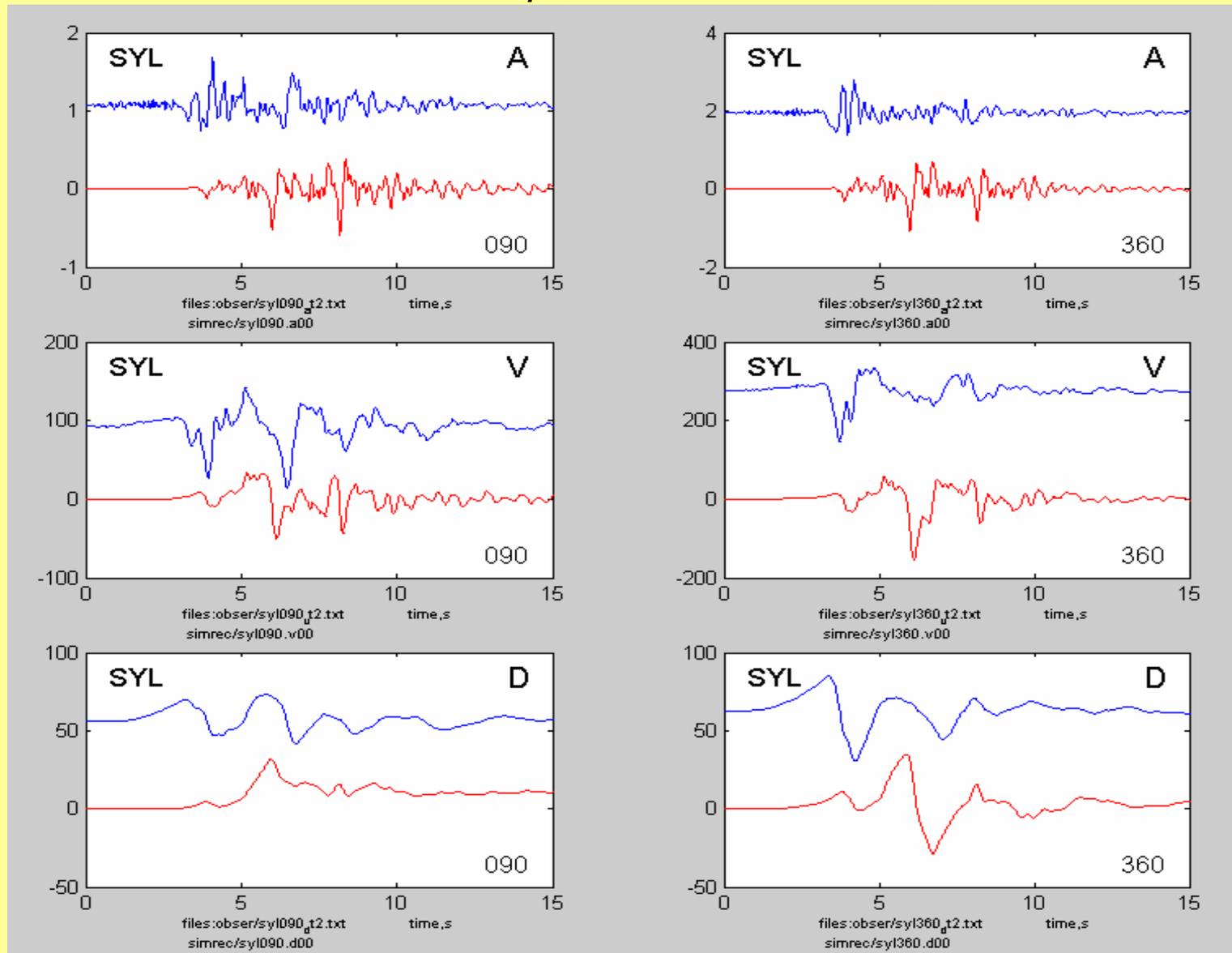


Варианты модельных сигналов объемных волн  
от очага в целом  
для однородной среды  
Варианты 206, 300



# Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

примеры модельных (красные) и наблюдаемых (синие) движений,  
ст. Силмар [подгонка не выполнялась]

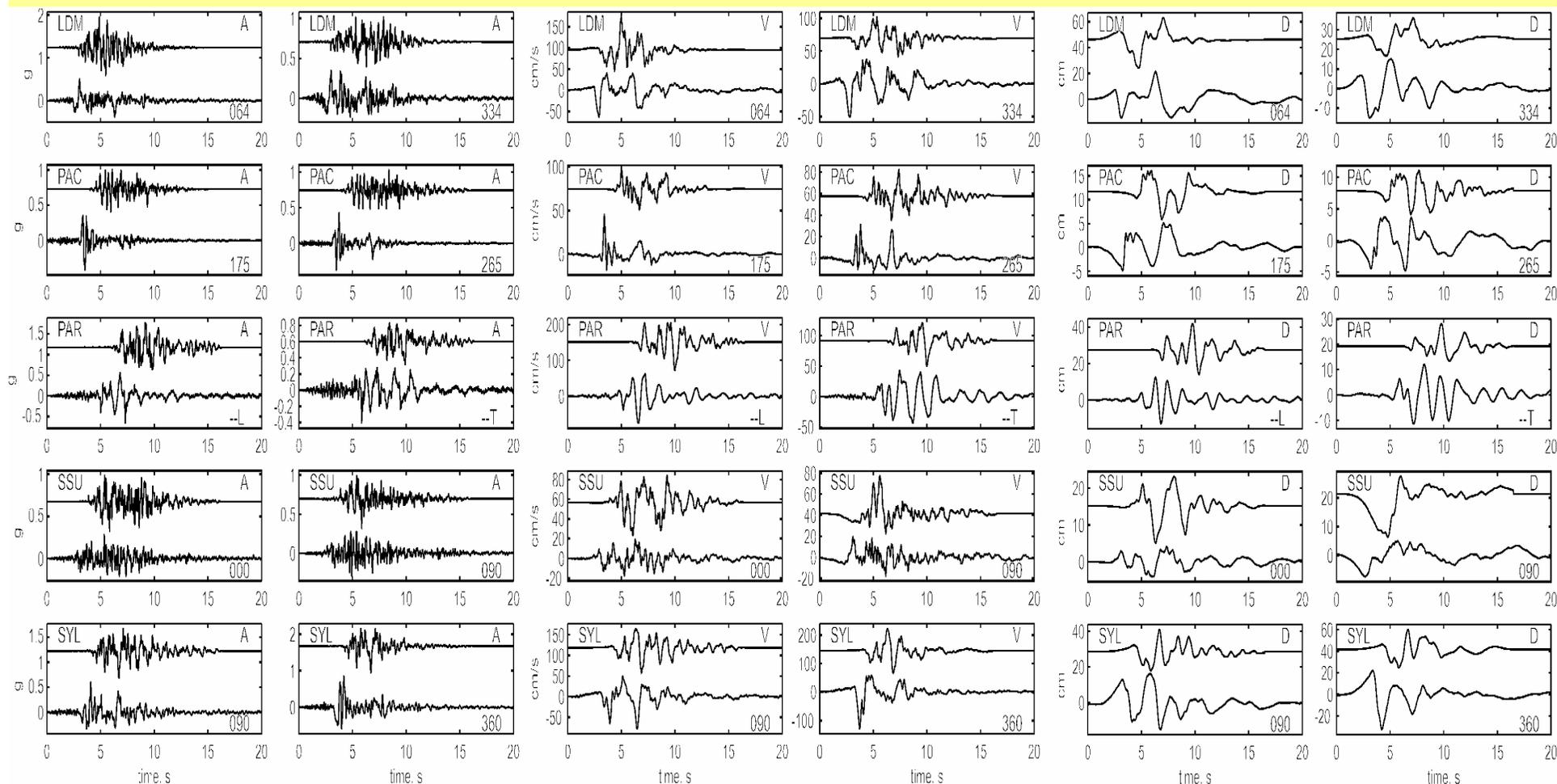


horizontal component:

090

360

# Сравнение наблюдений и модельных сигналов (вар206) две горизонтальные компоненты на 5 станциях ускорение, скорость и смещение

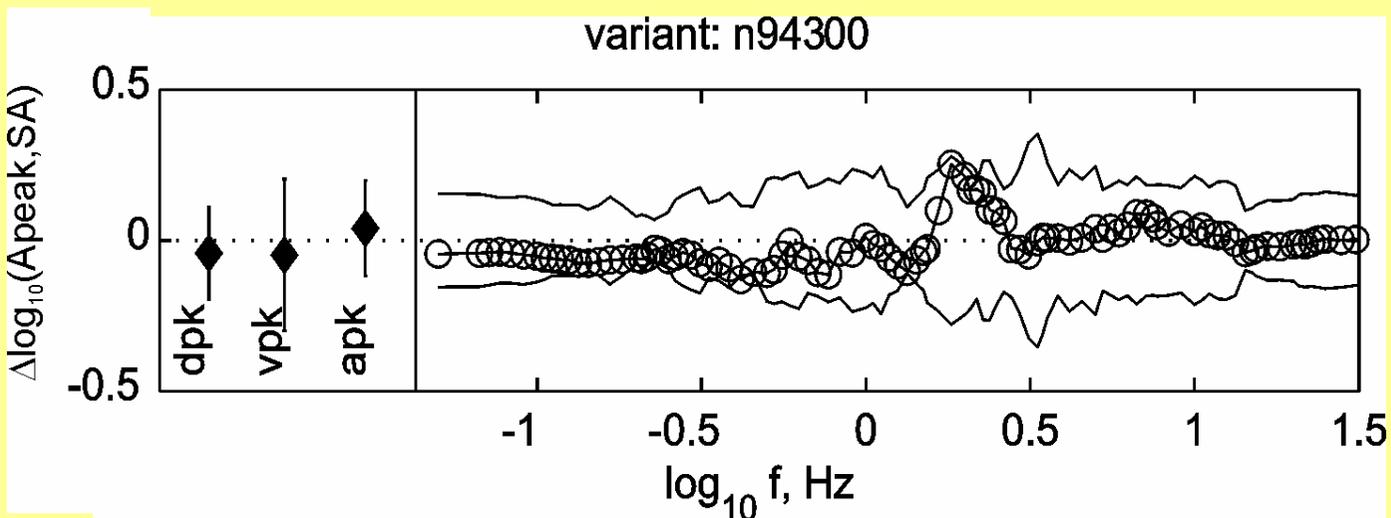
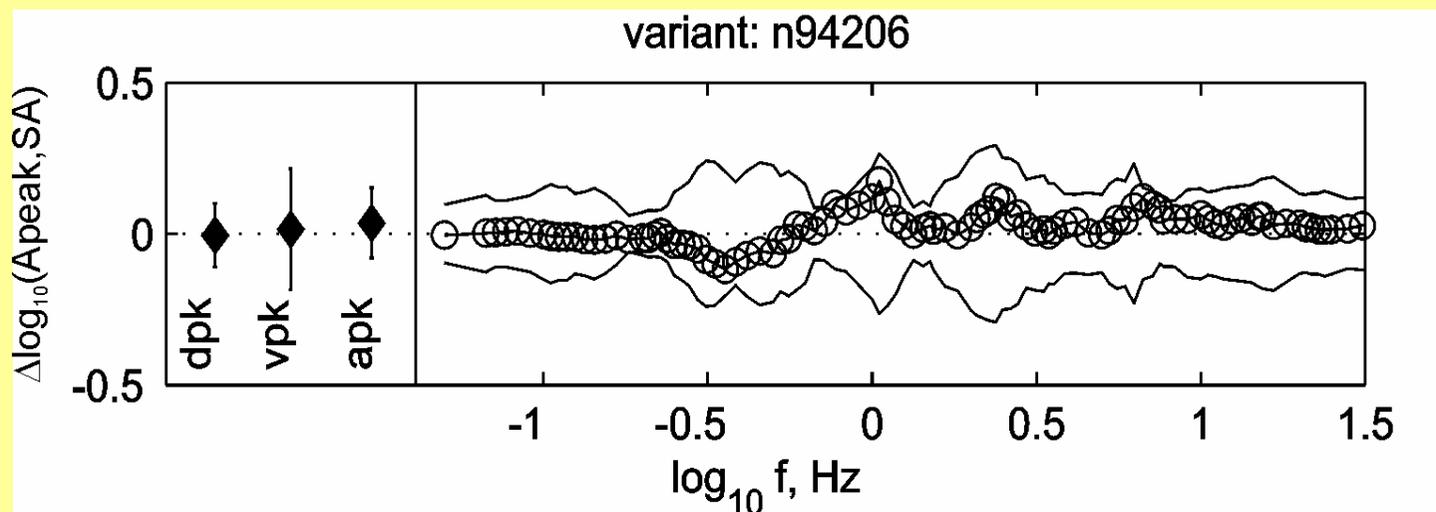


(LDM,PAC - скальный; SSU-средний грунт; PAR, SYL - осадочный бассейн)

верхняя запись-модель, нижняя - наблюдаемая

# Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

## Невязка пиковых амплитуд A, V, D и спектров реакции:



Средняя невязка и с.к. разброс в единицах  $\log_{10}$  по 19 станциям вблизи очага (модель минус набл.). Средняя невязка  $\sim 0.03$ , с.к. отклонение  $\sim 0.23$

## Оценка неопределенности моделированного движения грунта: список изученных факторов

Группа А. Случайные и рандомизованные факторы (анализ в терминах дисперсий):

- (1) результирующая подвижка
- (2) временной ход субисточников
- (3) распространение разрыва (случайность временного хода, относительные колебания скорости)
- (4) значение средней скорости разрыва
- (5) положение гипоцентра

Группа С. Фактор станции/площадки (анализ на чисто эмпирической основе)

Группа В. Параметрические факторы (анализ в терминах коэффициентов чувствительности) :

1. Величина сброшенного напряжения.
2. Размах колебаний скорости разрыва  $DV$
3. Показатель  $s$  в степенном законе для спектра результирующей подвижки
4. Параметр логнормального закона для временного хода субисточников  $CVAT$  parameter
5. Параметр логнормального закона для временного хода субисточников  $CVAT$
6.  $M_0$
7. Глубина центра тяжести очага

## Оценки неопределенности

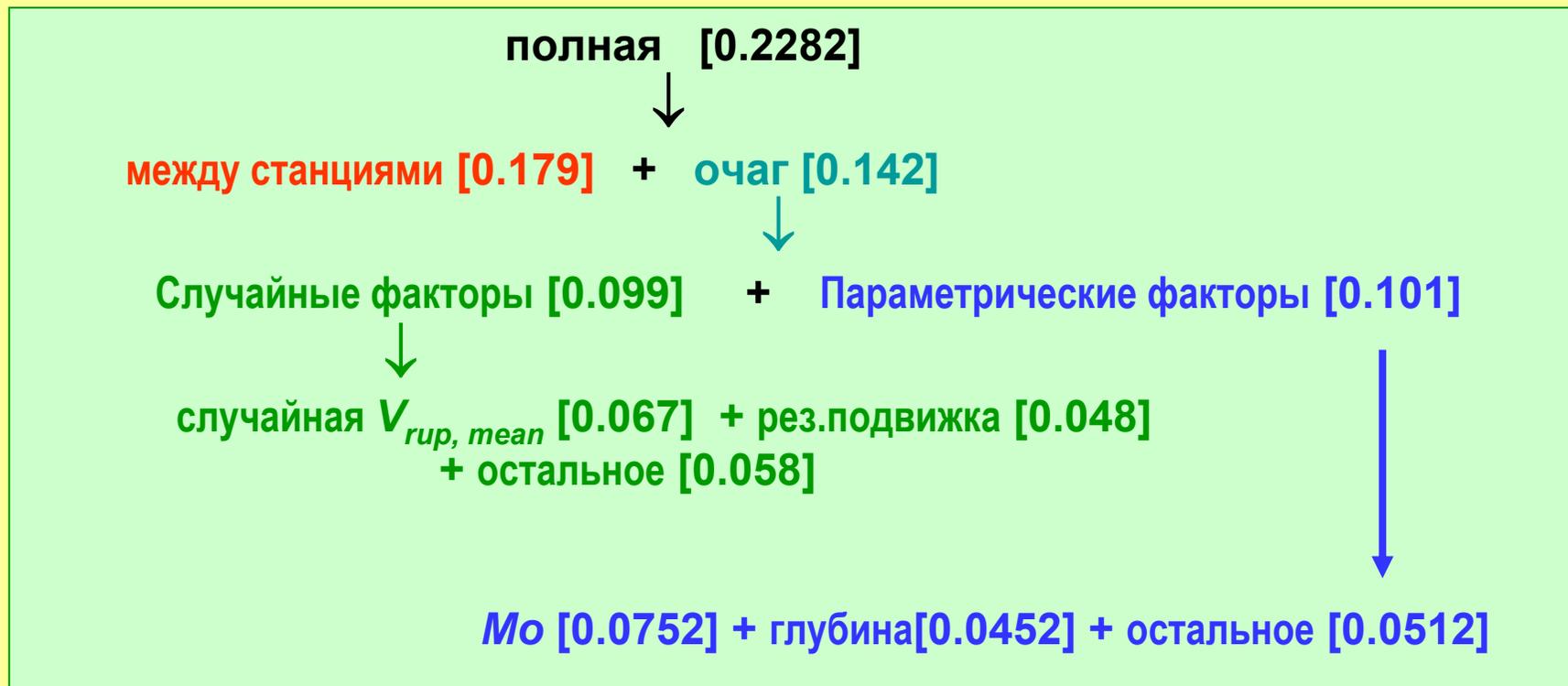
### А: Случайные: с.к.о. значений $\log_{10}(\text{PSA})$

(1) результирующая подвижка	0.047
(2) временной ход субисточников	0.022
(3) распространение разрыва (случ.факт.)	0.042
(4) положение гипоцентра	0.031
(5) средняя скорость разрыва	0.067

### В: Параметрические: **чувствительность** · (предполагаемое с.к.о. фактора) = с.к.о. для $\log_{10}(\text{PSA})$

1. $\text{Log}_{10}(\Delta\sigma)$	0.32 · 0.1 =	0.031
2. $DV$ : отн.разброс V-разрыва	~0 [??]	
3. Показатель $s$ в спектре подвижки	0.016(мал)	
4. $CVAT$	0.19 · 0.15 =	0.028
5. $CVAXY$	0.09 · 0.15 =	0.013
6. $M_0$	1 · 0.075 =	0.075
7. $H$ центр тяжести	0.02 · 2.5 =	0.024

**Оценки неопределенности для случая события Нортридж 1994.**  
Важнейшие компоненты дисперсии охарактеризованы значением стандартного  
уклонения для  $\log_{10}(\text{PSA})$  (среднее по частотам)



*Оценки имеют иллюстративный характер; реальная неопределенность выше*

# Заключение

1. Описанная методика моделирования включает **ограниченный** список факторов очага и среды, **наиболее критичных** для реалистического прогноза колебаний грунта.

Это - компромисс между простейшими моделями в виде точечного очага или набора трещин - субочагов и продвинутыми технологиями моделирования, для которых, с одной стороны, нужны большие ресурсы, а, с другой стороны, редко имеется достаточно исходных данных.

2. Методика предназначена для моделирования движений грунта:

- на **расстояниях** от ~3-10 км до 200-400 км от разлома-очага
- в широком диапазоне **магнитуд**
- в **широкой полосе частот** (включая смещения и скорости вблизи разлома на периодах 10-20 с)

3. Предложенная методика применима для прикладного моделирования.

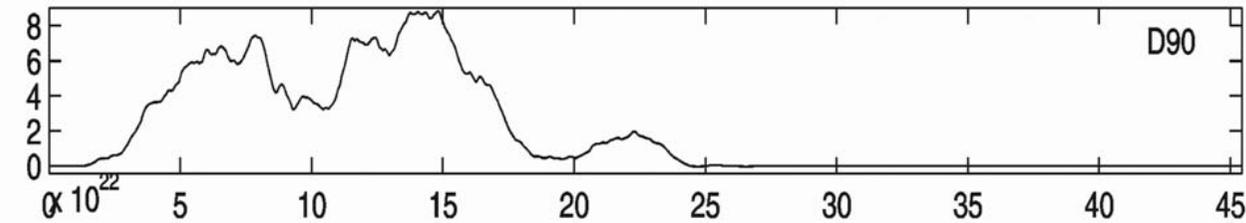
Например для случая **конкретного сценарного** очага можно получить:

- (1) **единичные примеры** движений грунта- для разовых расчетов
- (2) **наборы примеров движений** грунта для геофизически допустимых вариантов движений грунта - для вариантных расчетов
- (3) оценки собственно **степени неопределенности** для параметров колебаний (амплитуды, спектры, длительности)

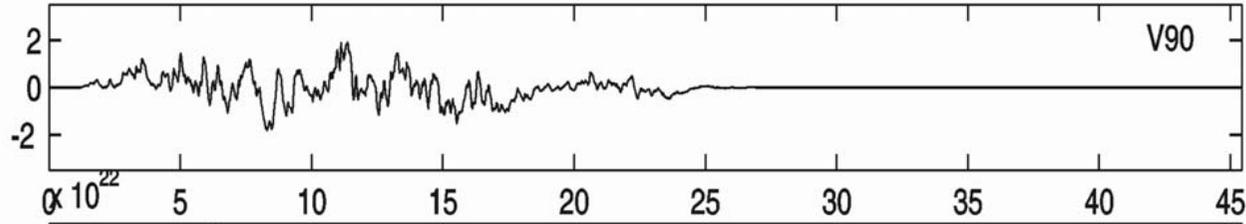
FIN

## Example far-field body-wave time functions (for uniform medium): directivity

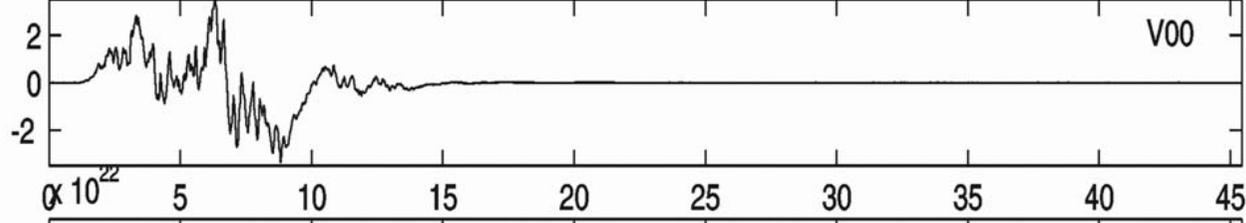
D, Az=90°



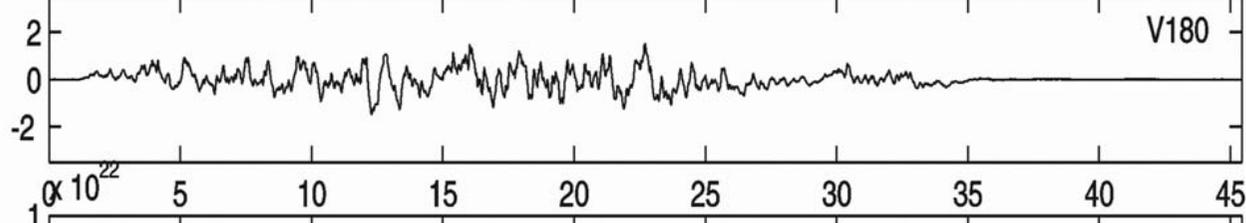
V, Az=90°



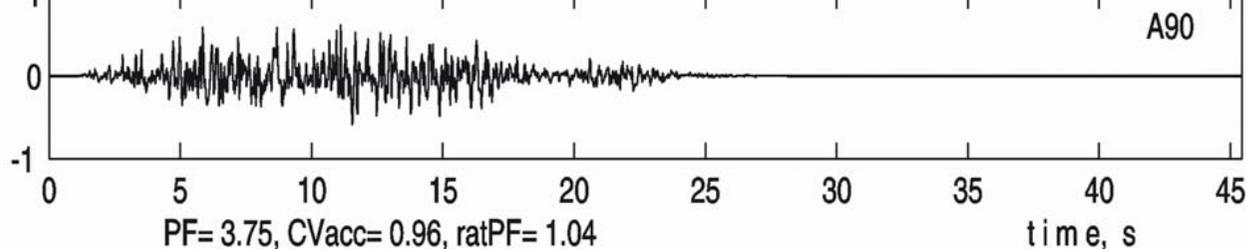
V, Az=0°  
(forward)



V, Az=180°  
(backward)



A, Az=90°



D90, V90  
and A90:  
For an  
observer on  
the normal  
to the fault

V0 and  
V180:  
similar to  
V90, but for  
an observer  
at the  
“forward”  
(+x) and  
backward”  
(-x)  
directions of  
a focal  
sphere.