

А. А. Гусев

**Методика моделирования сильных движений
грунта в широкой полосе частот и ее
применение при моделировании движения
грунта при реальных и модельных
землетрясениях**

Работа выполнялась совместно с В.М.Павловым и Е.М.Гусевой.

*Методика разработана по предложению и с поддержкой
иностранного члена РАН Джулиано Панца*

Автор приносит извинения за англоязычные подписи на части графиков

Цель разработки новой методики

Создать 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 и для очагов больших магнитуд
- широкая полоса моделируемых частот (0,03-25 Гц)

Принятое ограничение:

- для скальных грунтов

Общий подход к сейсмологически обоснованному моделированию движения грунта:

(1) Описать очаг-излучатель волн

(2) Описать распространение волн:

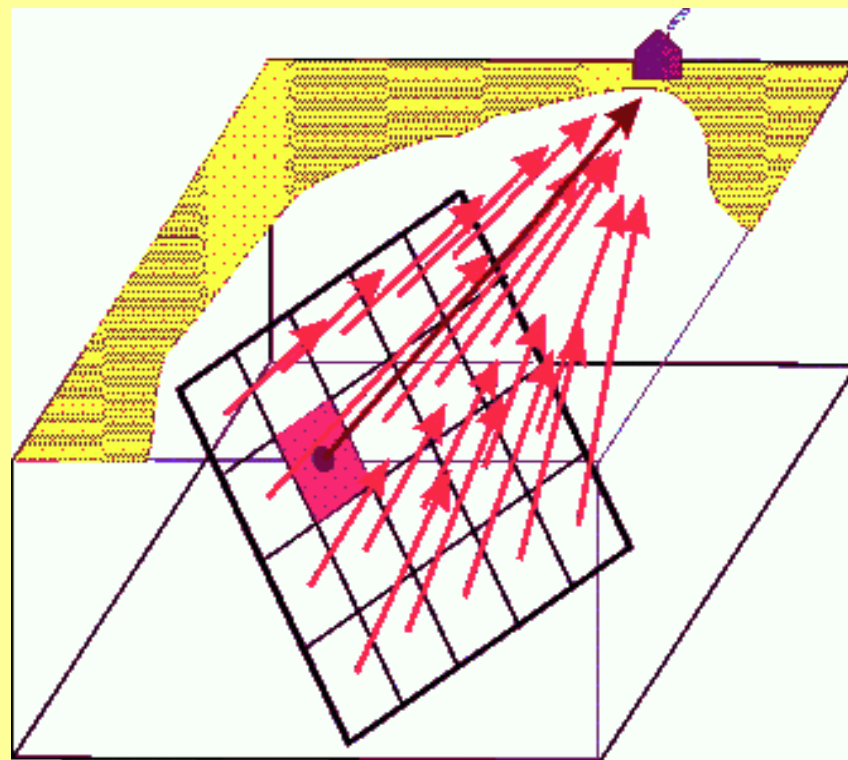
2а – в твердой Земле

2б – в приповерхностном слое мягкого грунта

(в данной работе не затронуто, изучен только случай скального грунта)

Очаг землетрясения описывается через сетку точечных источников-дислокаций с заданным временным ходом

Чтобы описать распространение волн, для каждого точечного источника вычисляются теоретические сейсмограммы (функции Грина) для модели среды в виде слоистого полупространства



Последовательность моделирования

- ***А. Очаг***

- 1. Выбор параметров очага
- 2. Моделирование распределения финальной подвижки (мощи субочагов)
- 3. Моделирование истории распространения фронта разрыва
- 4. Моделирование временного хода скольжения в каждом субочаге

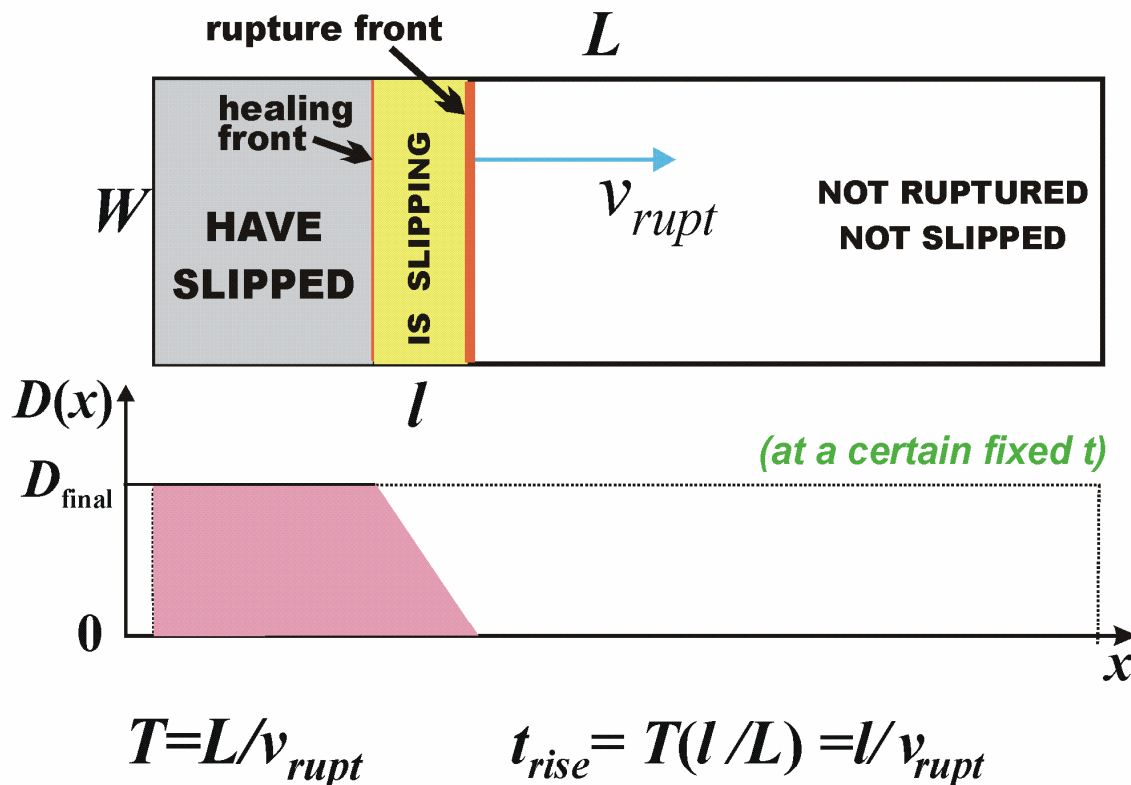
- ***Б. Среда***

- моделирование теор.сейсмограмм для всех пар субисточник – приемник (=стройплощадка)

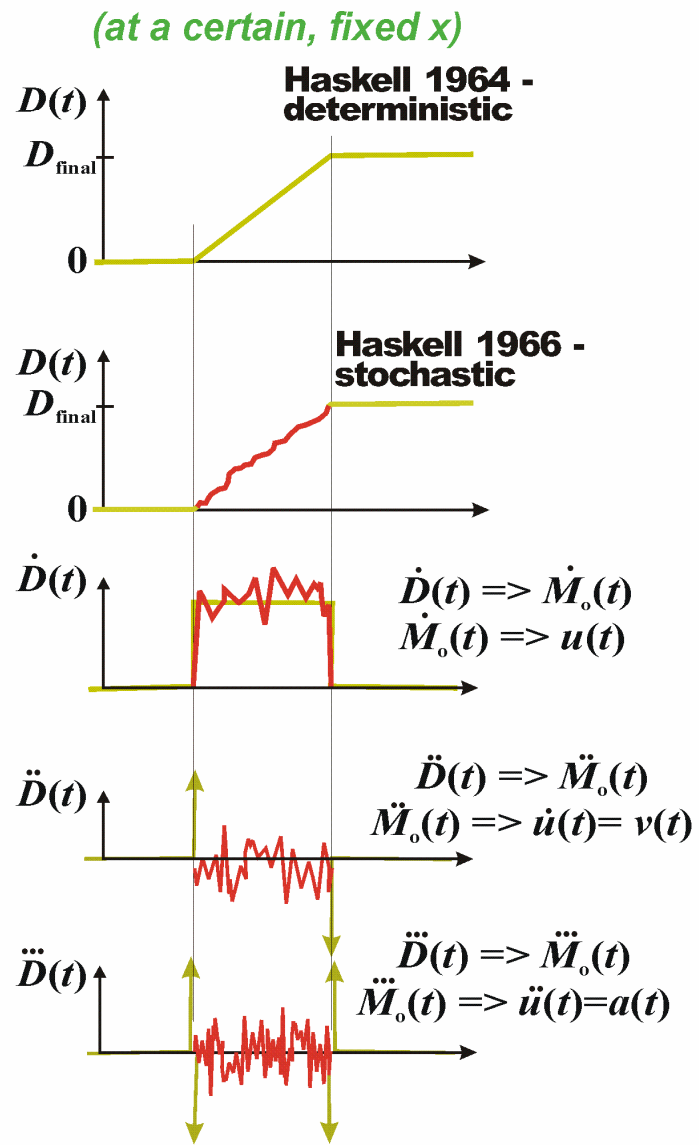
- ***В. Объединение вкладов очага и среды***

Базовая модель очага: по Хаскеллу-Аки-Хитону:
бегущая 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 $1/10$



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 : **$p=1.5$**]

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»)

Процедура моделирования

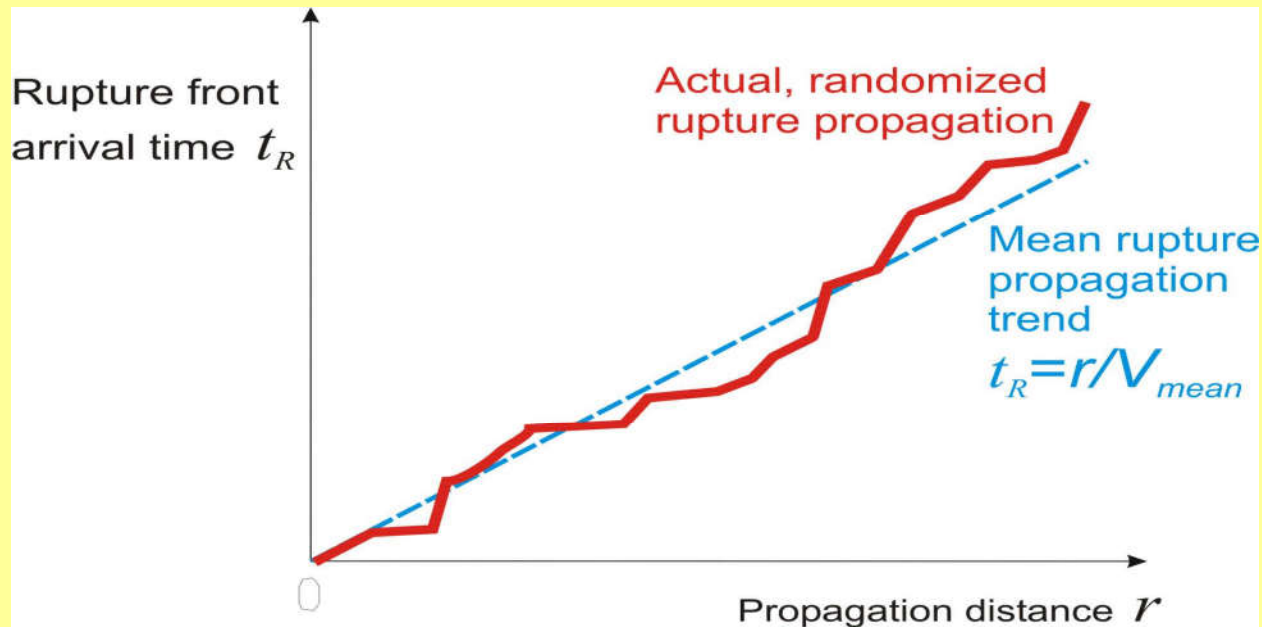
С. Моделирование истории распространения разрыва

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.

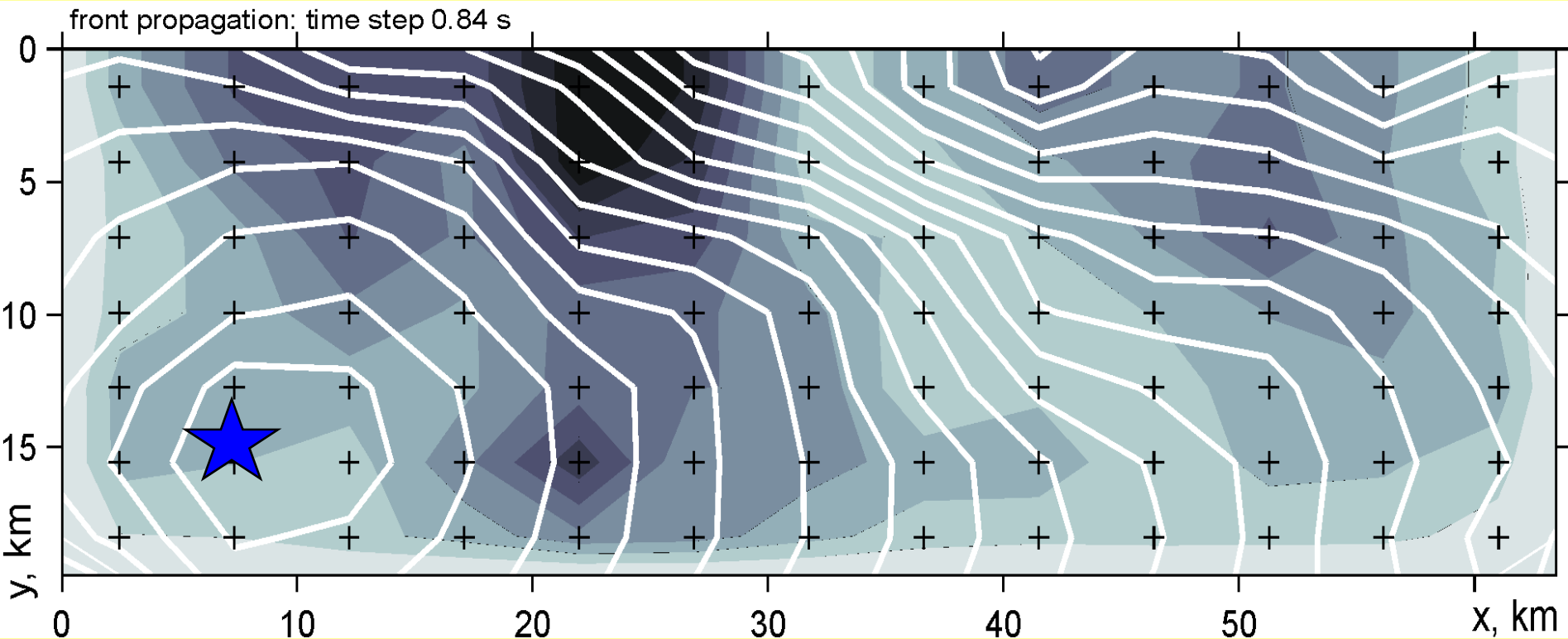
Модель 1: Круговые фронты, скорость варьирует вдоль радиуса

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



Пример моделирования финальной подвижки

Градации серого: амплитуда подвижки = мощность субисточника
Белые контуры: последовательные положения фронта разрыва
★ гипоцентр
+ субисточник



$M_w=7.2$, $L = 63$ km, $W=20$ km. Сетка субисточников 13×7 .
[ось y - по падению; ось x – по простиранию]

ПЕРЕДЫШКА

Итак, мы уже описали

- (1) «силу» (сейсмический момент) каждого субисточника
- (2) временной ход фронта разрыва и
порядок включения субисточников

Дальше нужно :

задать временной ход каждого индивидуального субисточника

Процедура моделирования

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

Для каждого субисточника, временной ход скорости подвижки представляется как реализация **нестационарного случайного шума**.

Шум генерируется в два шага:

Шаг 1. Генерация сегмента приблизительно **белого** шума

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

Процедура моделирования

D. Моделирование временного хода локальной подвижки для субисточника (2)

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

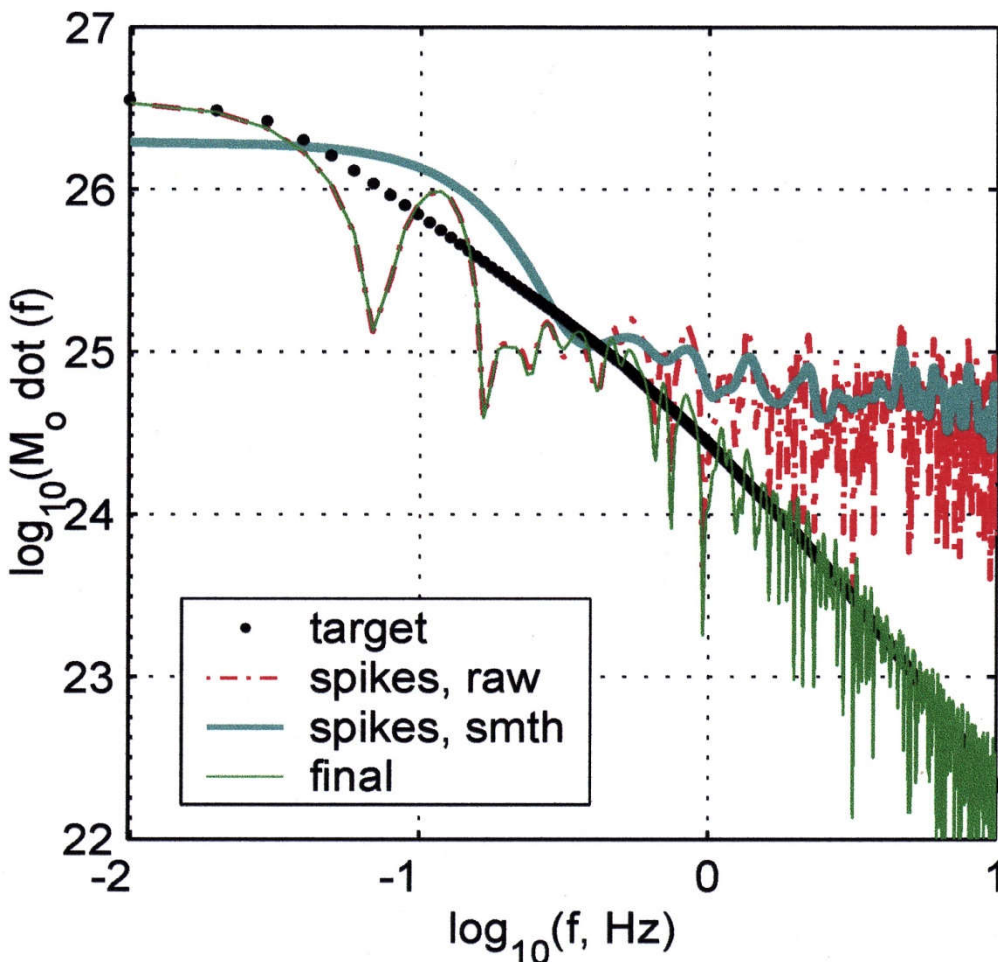
- форма огибающей** (прямоугольная, симметричное окно, $t \exp(-t)$ и др.);
- длительность** (уже определена через время нарастания подвижки);
- закон распределения амплитуд** (снова принят логнормальным)

Процедура моделирования
D. Моделирование временного хода локальной подвижки
для субисточника (3)

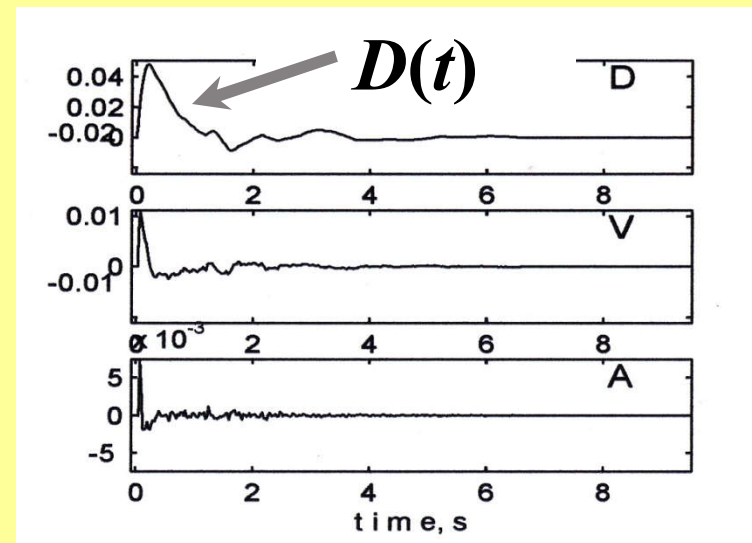
Шаг 2. «Окрашивание» шума таким образом, чтобы обеспечить заданную реалистическую форму очагового спектра *для очага в целом* .

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.

$\dot{M}_0$ spectra



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

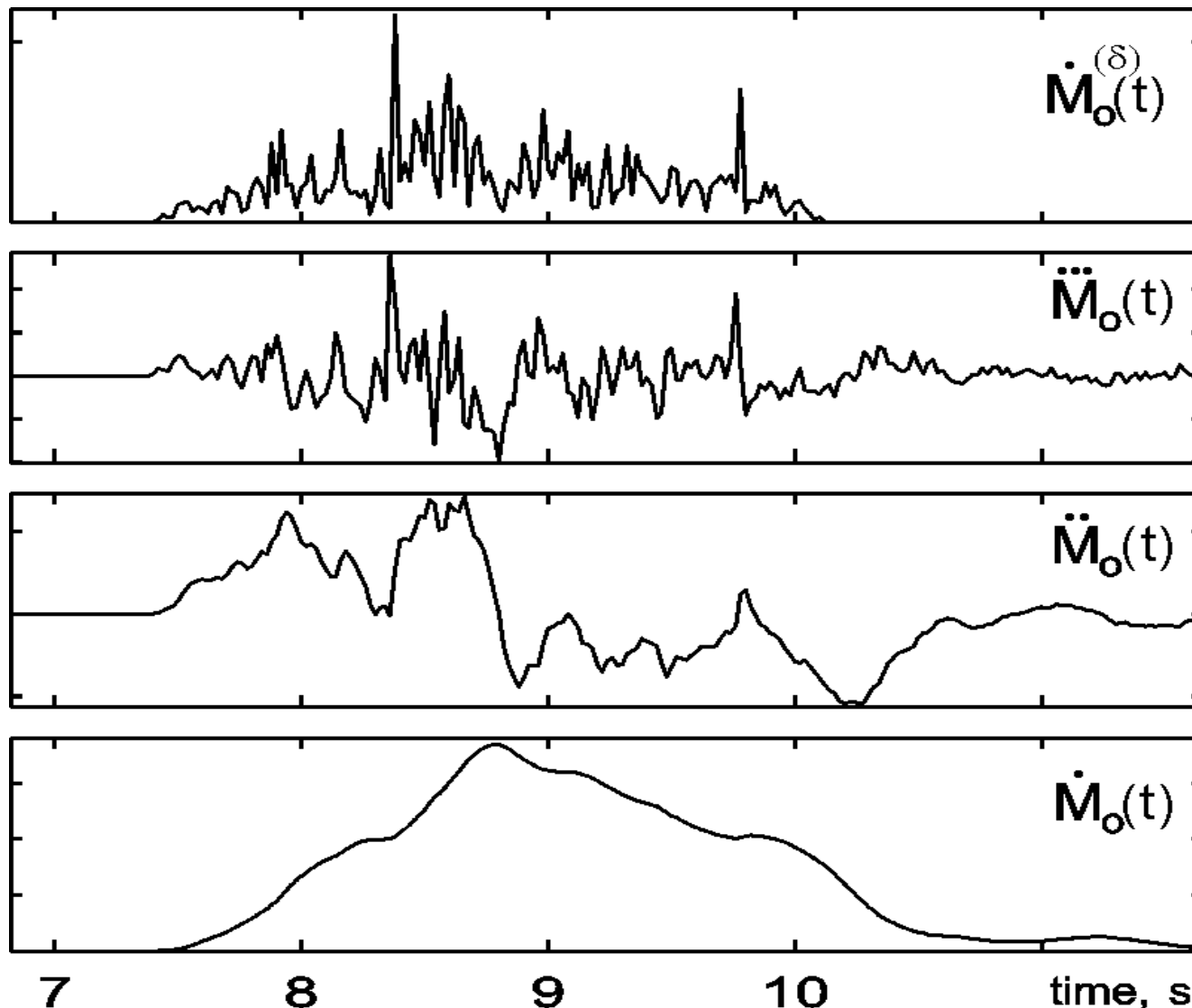


Первое приближения очага (**красный спектр**) модифицируется путем свертки временного хода каждого субисточника с корректирующим импульсом ($D(t)$, справа) с единичной площадью.

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**).

Пример модельного временного хода индивидуального субисточника



сегмент приблизительно
белого шума
(положительный, с
заданной огибающей)

[до коррекции спектра]

окончательный вариант:

“ускорение”

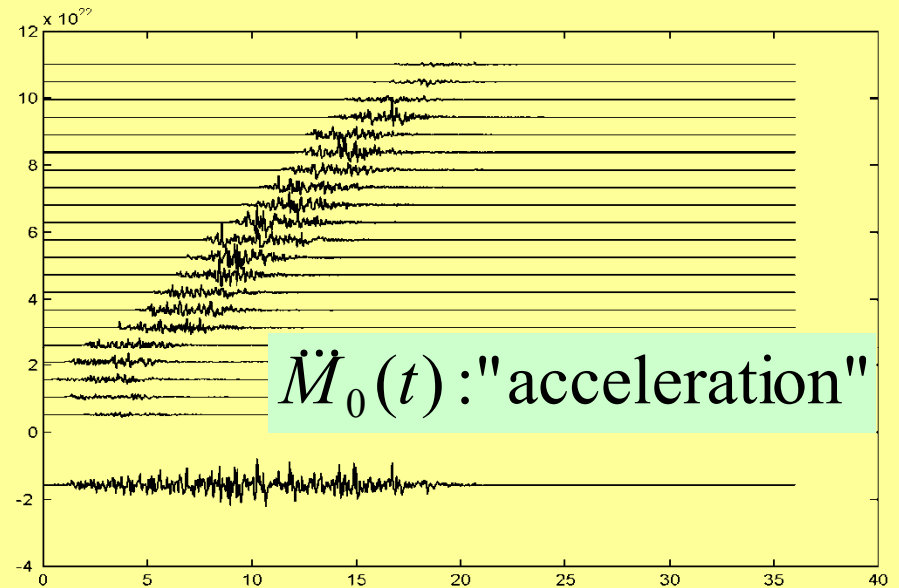
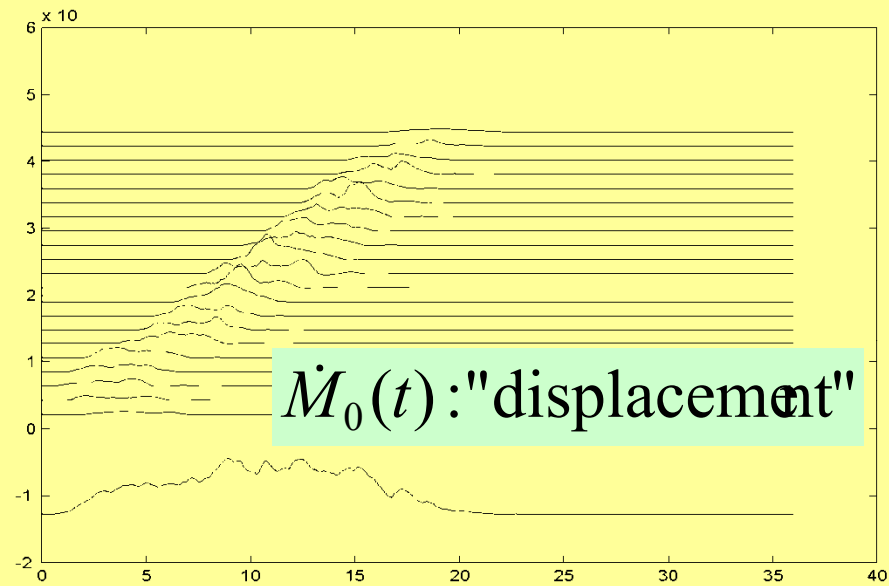
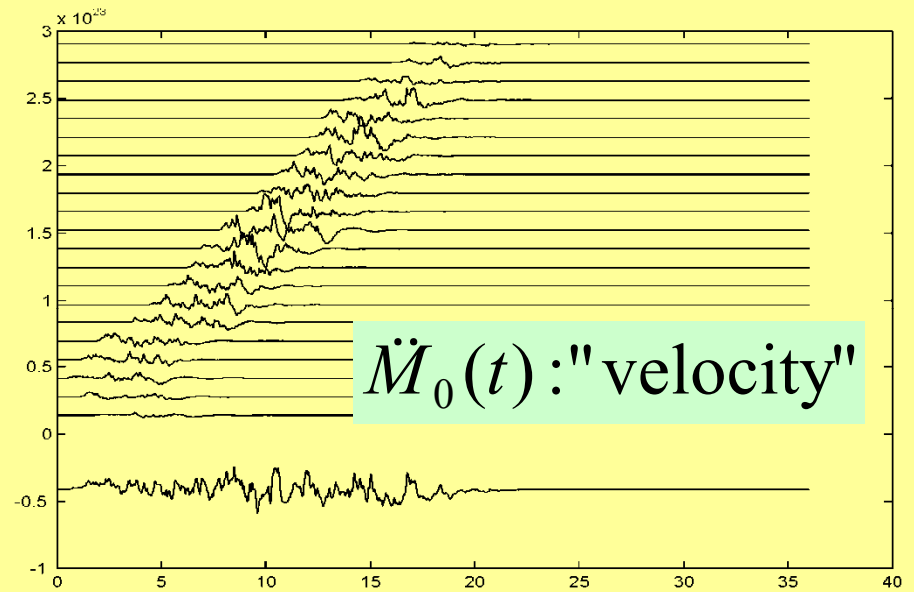
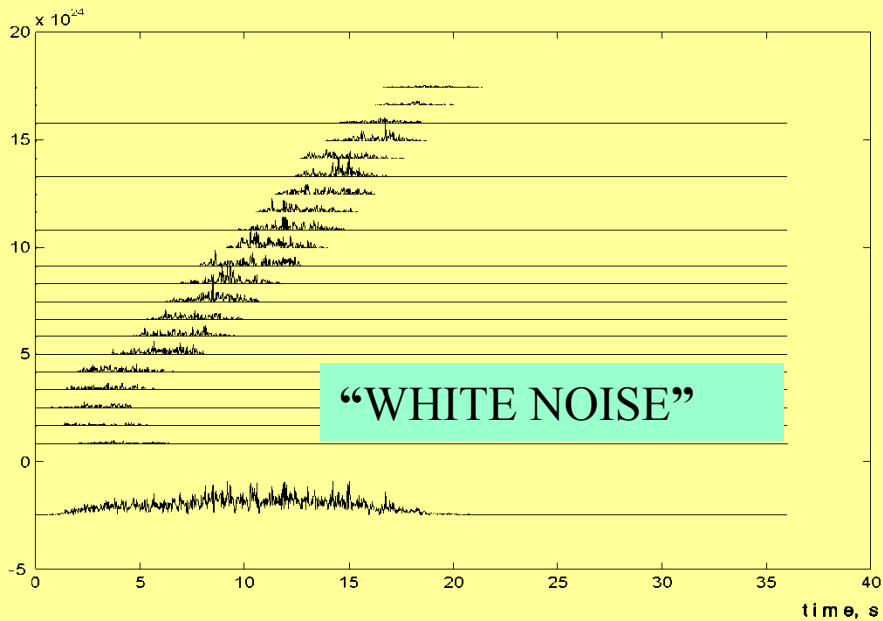
“скорость”

“смещение”

(скорость изменения
сейсмического
момента)

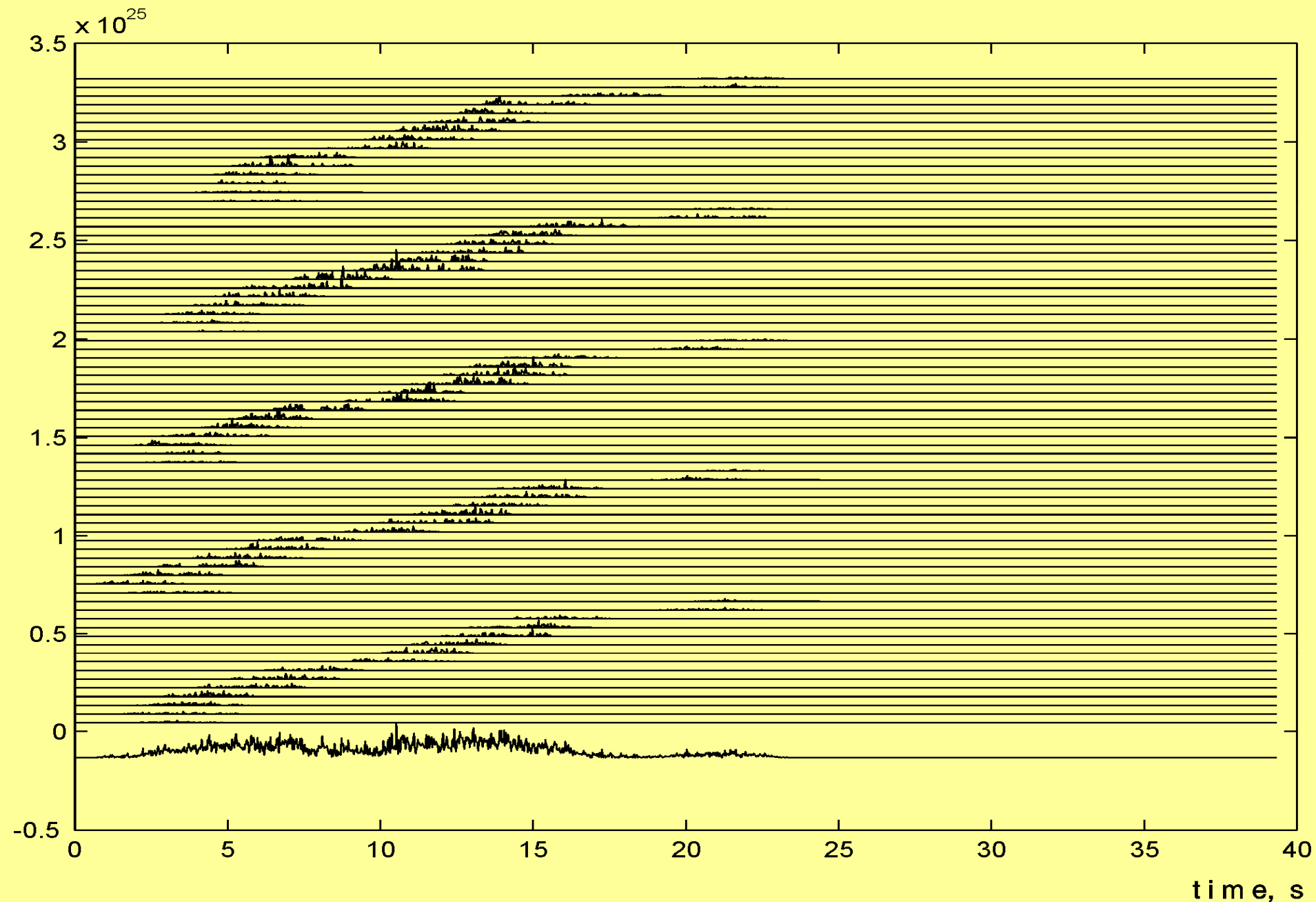
Длительность функции окна $2 \times (\text{время нарастания}) = 3.8$ s.

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



Временной ход 75 субисточников («белый шум»)

(для модельного очага с сеткой субисточников 15x5)



Пример моделирования временного хода амплитуд S-волн в дальней зоне в однородной среде: направленность излучения

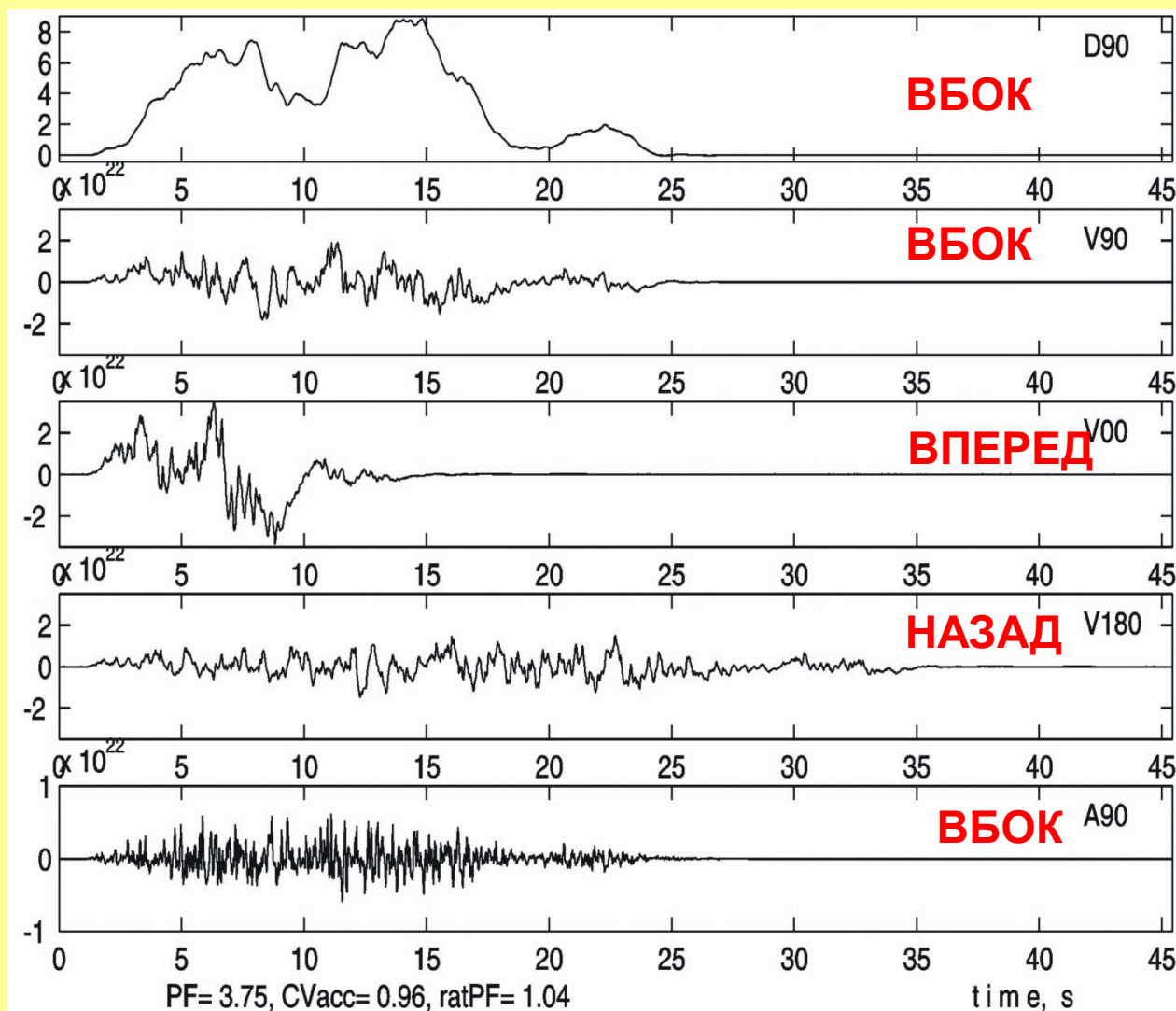
D, $Az=90^\circ$
(ББОК)

V, $Az=90^\circ$
(ББОК)

V, $Az=0^\circ$
(ВПЕРЕД)

V, $Az=180^\circ$
(НАЗАД)

A, $Az=90^\circ$
(ББОК)



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.

ПЕРЕДЫШКА

На этом оканчивается описание методики моделирования разлома-очага

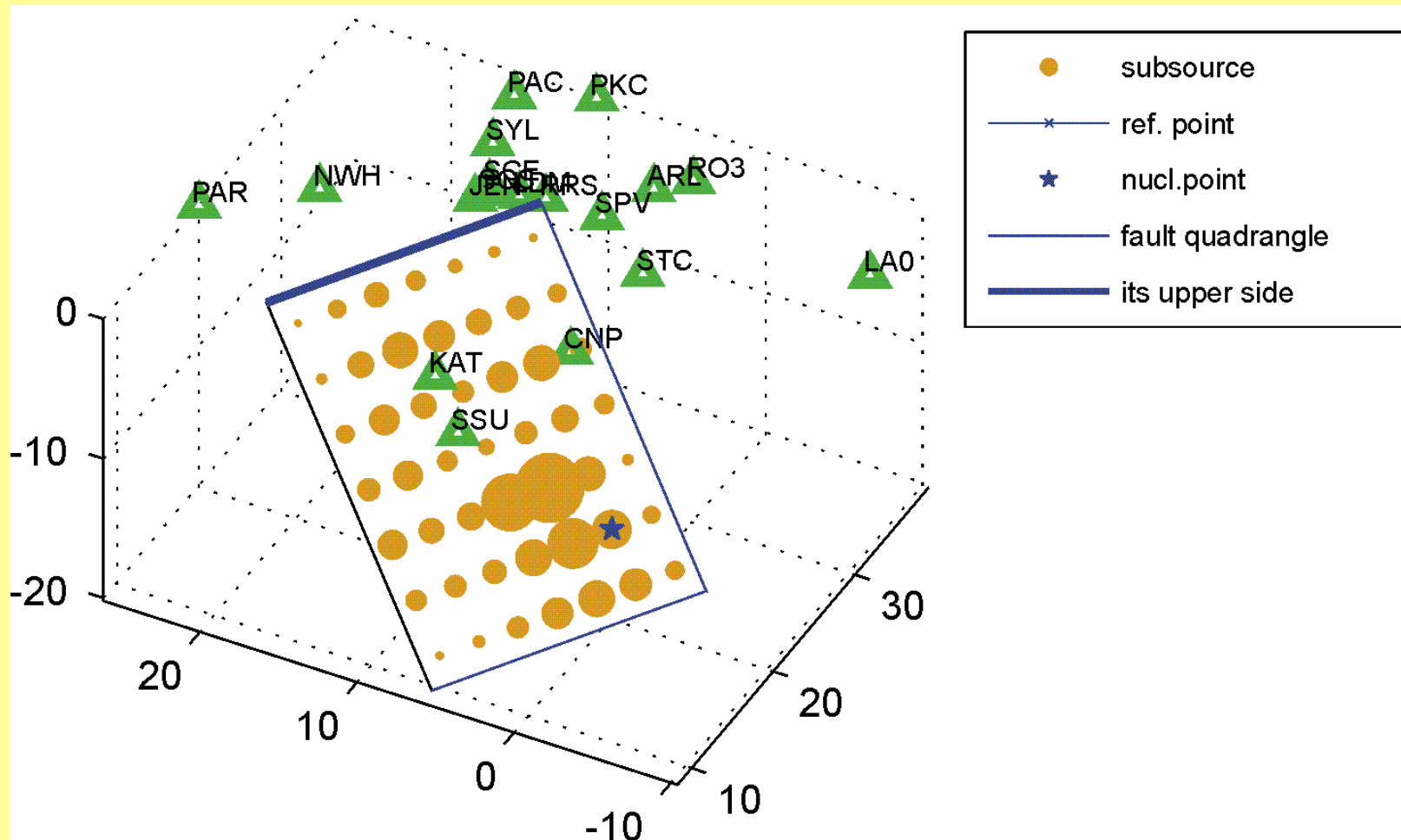
Описание новой эффективной методики расчета распространения волн в слабо неупругой слоистой среде опущено. Это – продвинутая и достаточно сложная методика, разработанная В.М.Павловым. Можно просить его сделать особое сообщение на эту тему.

Объединение моделей очага и распространения волн в среде – простая техническая задача (свертка), описание которой также опускаем.

Переходим к моделированию конкретных землетрясений.

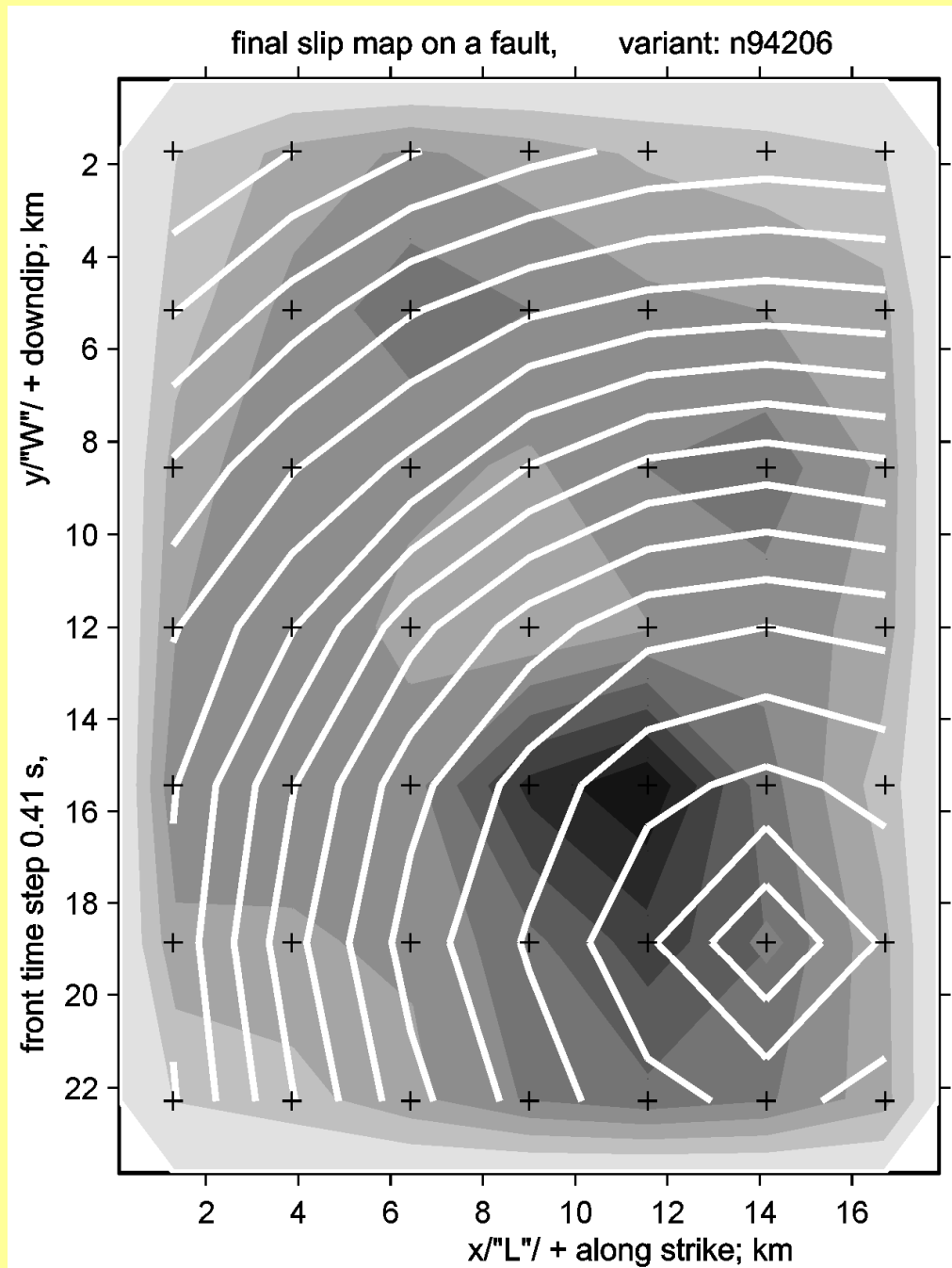
Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

Общий вид



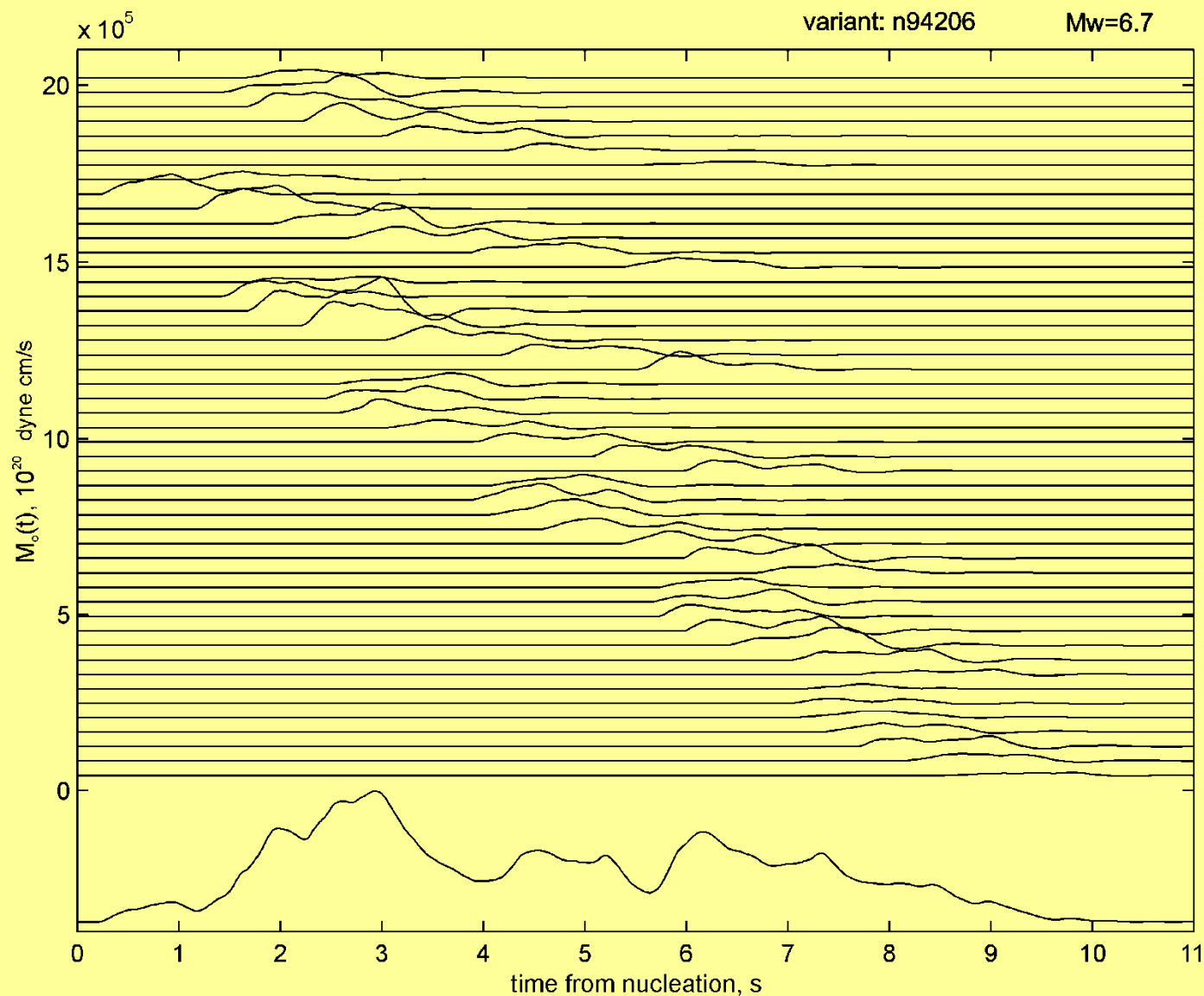
Тестовый пример:
землетрясение
Нортридж 1994

Модельная
результатирующая
подвижка в очаге
Вариант 206

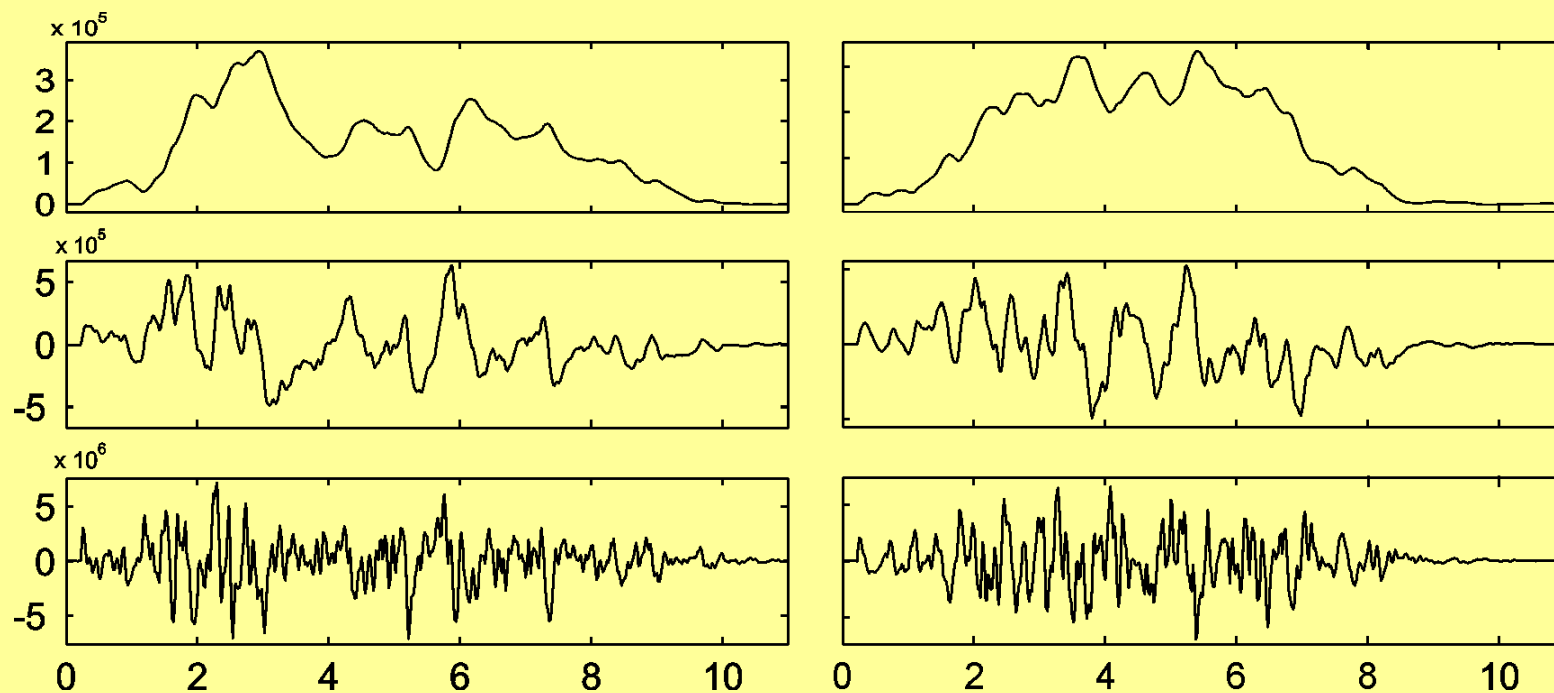


Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

Временной ход смещения для 49 субисточников. Вариант 206

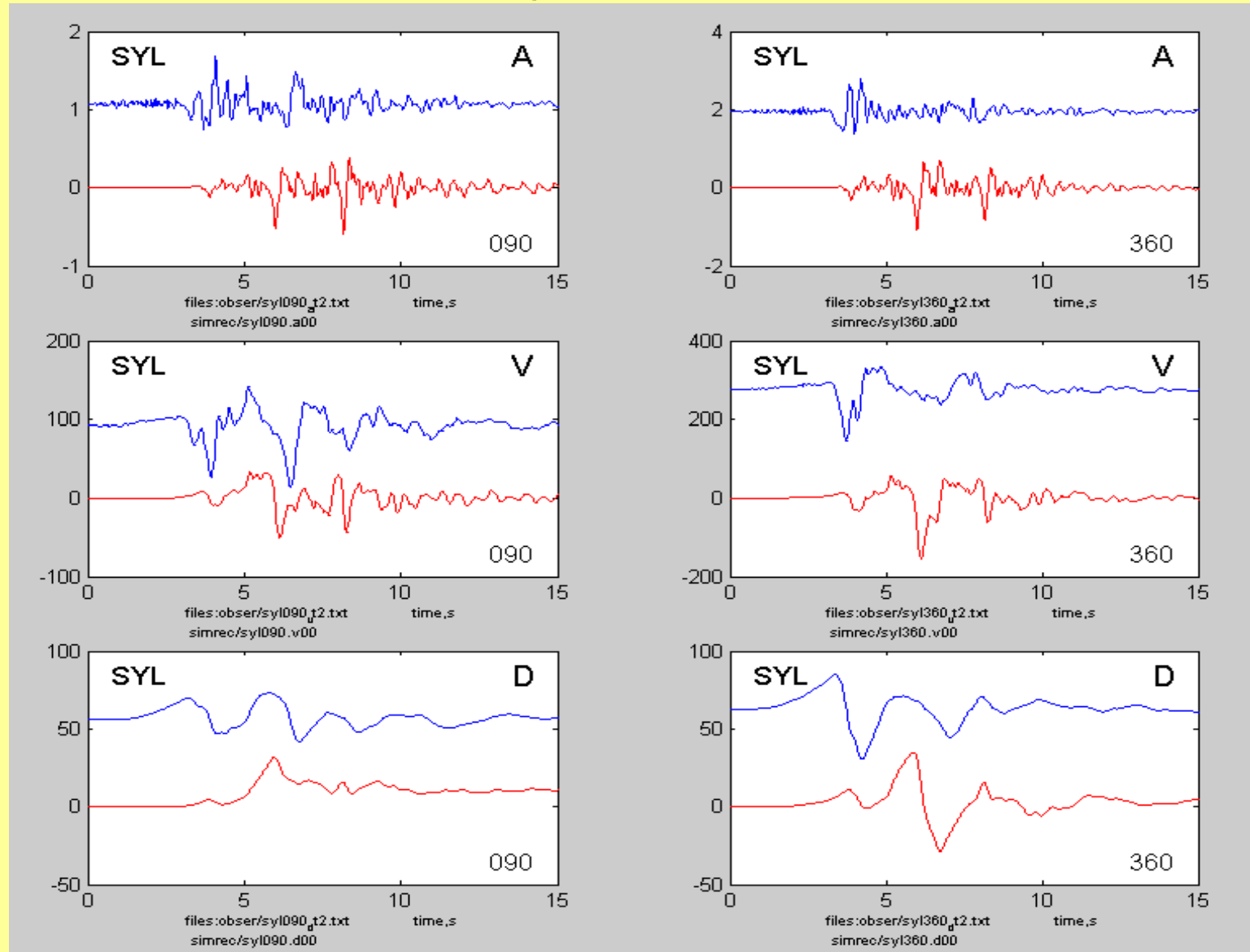


Варианты модельных сигналов объемных волн
от очага в целом
для однородной среды
Варианты 206, 300



Тестовый пример: землетрясение Нортридж 1994

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



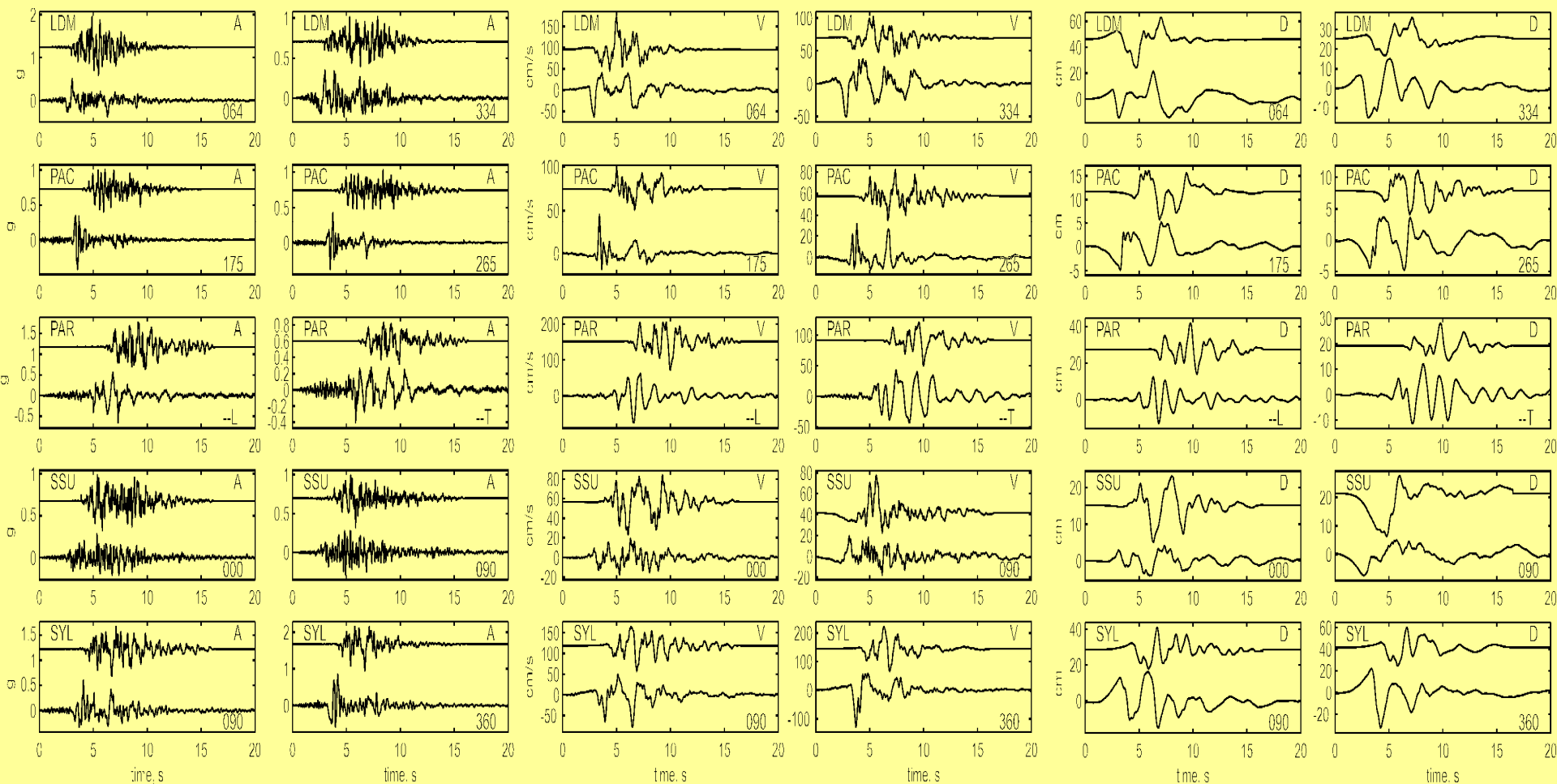
horizontal component:

090

Сравнение наблюдений и модельных сигналов (вар206)

две горизонтальные компоненты на 5 станциях

ускорение, скорость и смещение

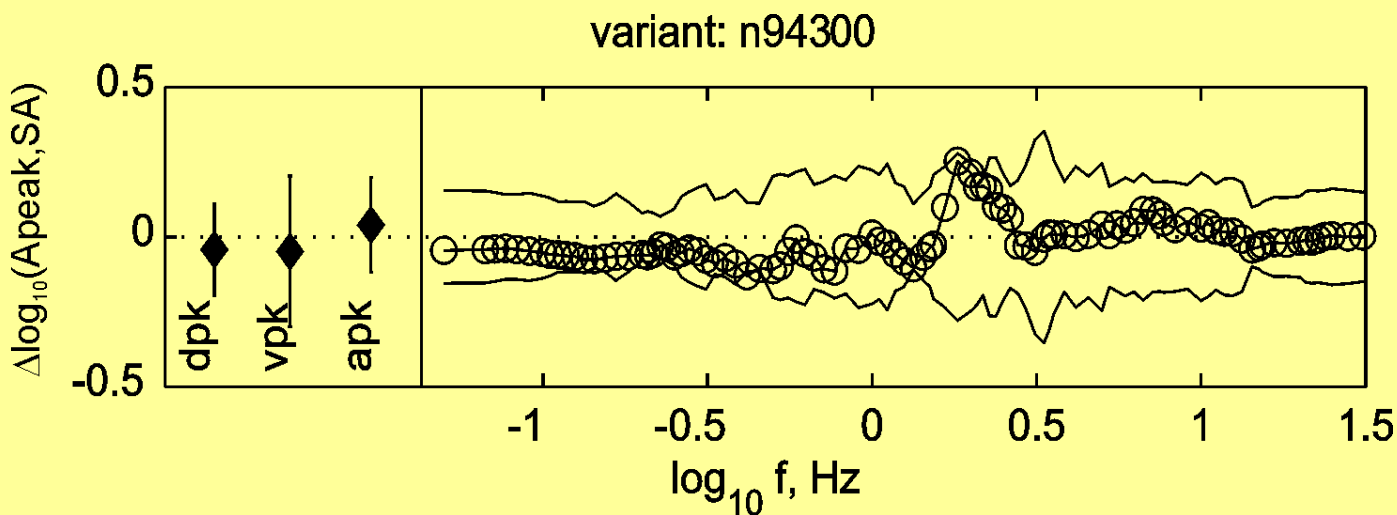
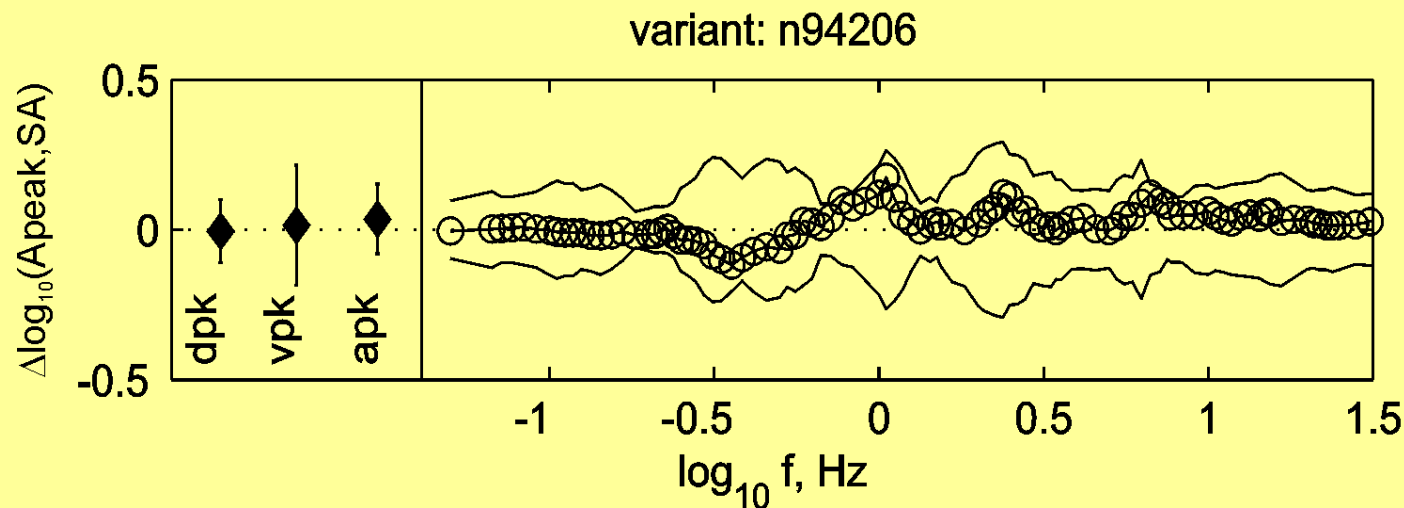


(LDM,PAC - скальный; SSU-средний грунт; PAR, SYL - осадочный бассейн)

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 ~ 0.03 , с.к. отклонение ~ 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

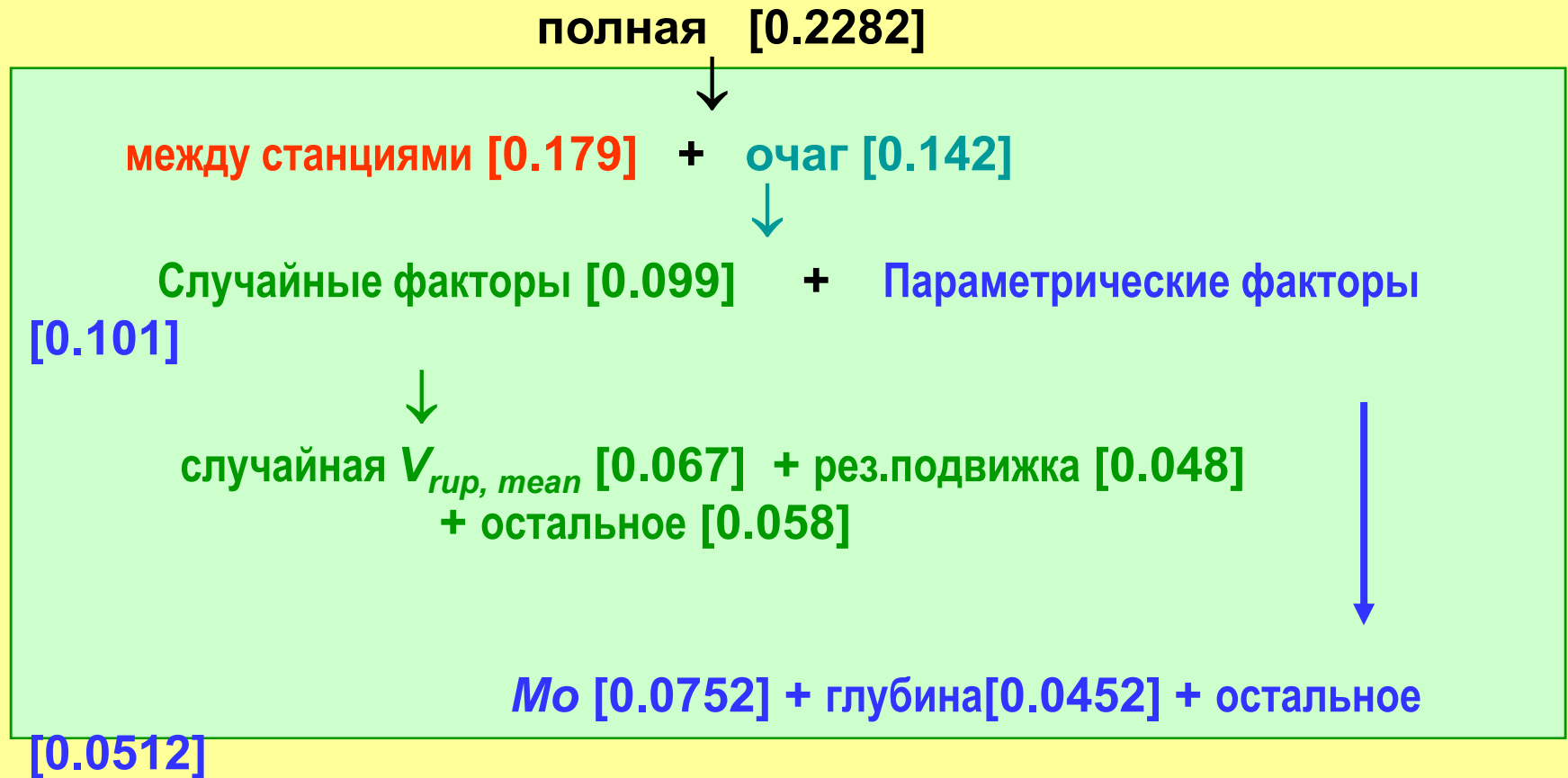
А: Случайные: с.к.о. значений $\log_{10}(\text{PSA})$

(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

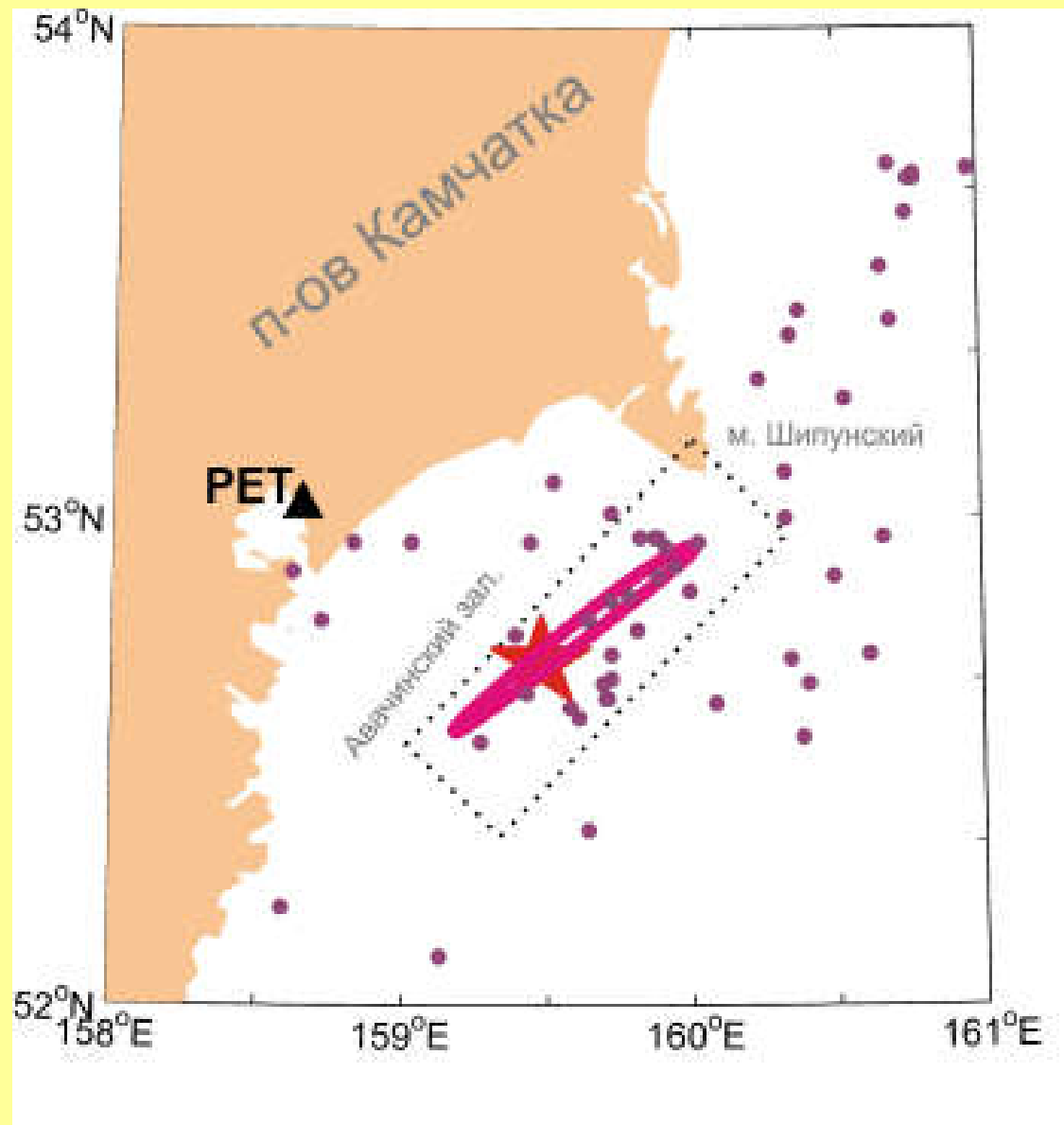
Оценки неопределенности для случая события Нортридж 1994.
Важнейшие компоненты дисперсии охарактеризованы значением стандартного
уклонения для $\log_{10}(\text{PSA})$ (среднее по частотам)



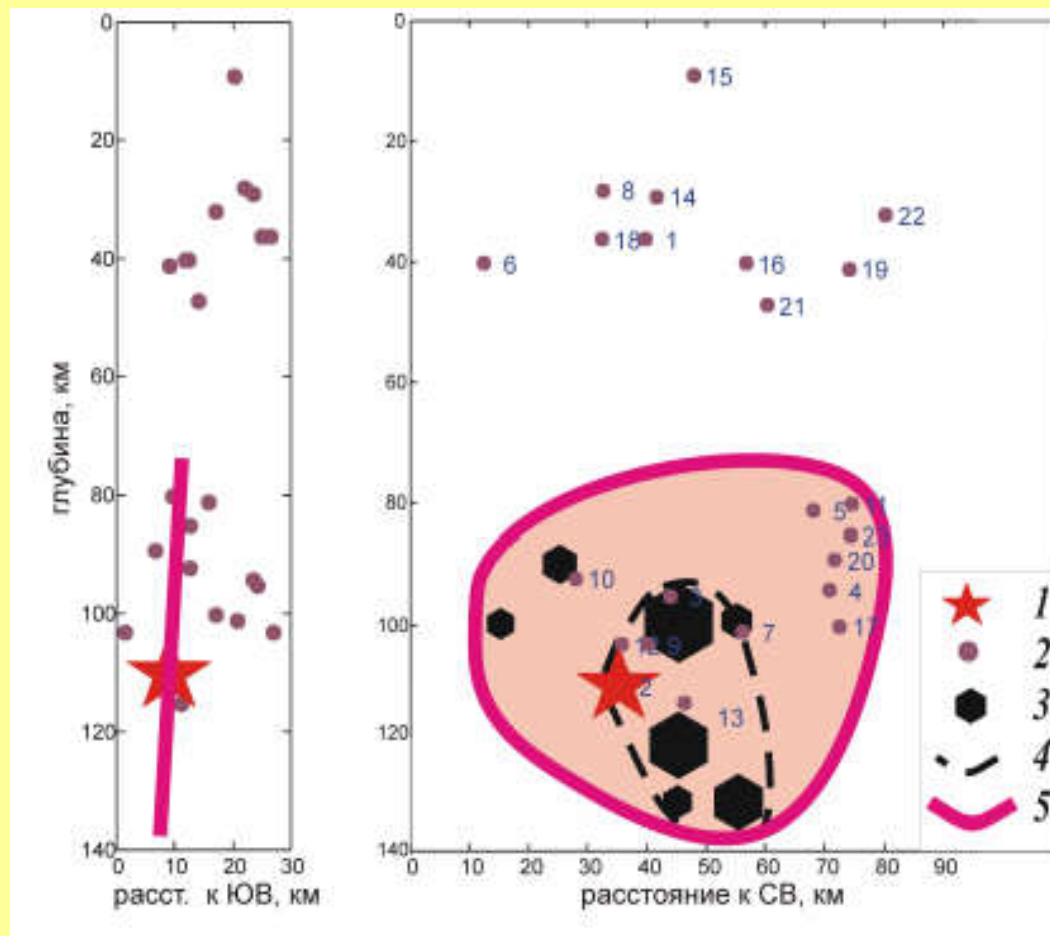
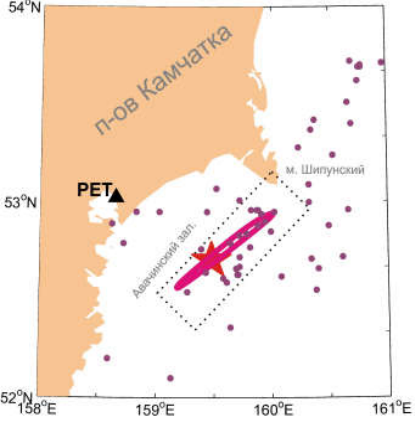
Оценки имеют иллюстративный характер; реальная неопределенность выше

Петропавловское землетрясение 24(25)ноября 1971г

(сильные движения записаны прибором С5С-ИСО на сейсмостанции «Петропавловск»)



Петропавловское землетрясение 24(25)ноября 1971г (2) вертикальные разрезы



1-гипоцентр основного толчка, 2 – гипоцентры форшока (номер 1, опережение 24 мин) и афтершоков за первые 2 месяца по региональному каталогу; 3 – субочаги – компоненты очагового процесса по FK87; 4 – область очага к концу 15 с по FK87; 5 – площадка очага, принятая в данной работе.

Способы и результаты практического моделирования

- Сейсмический момент, положение гипоцентра, размеры и расположение разрыва в пространстве, «механизм очага» и длительность развития разрыва считались известными заранее; использованы результаты ряда опубликованных работ.

При этом конкретное значение сейсмического момента, длительность развития разрыва и механизм очага подобраны из диапазона опубликованных вариантов.

- Для описания очагового спектра выбрана формула двугорбого спектра по Аткинсон (1993) (формула типа «2Brune»).

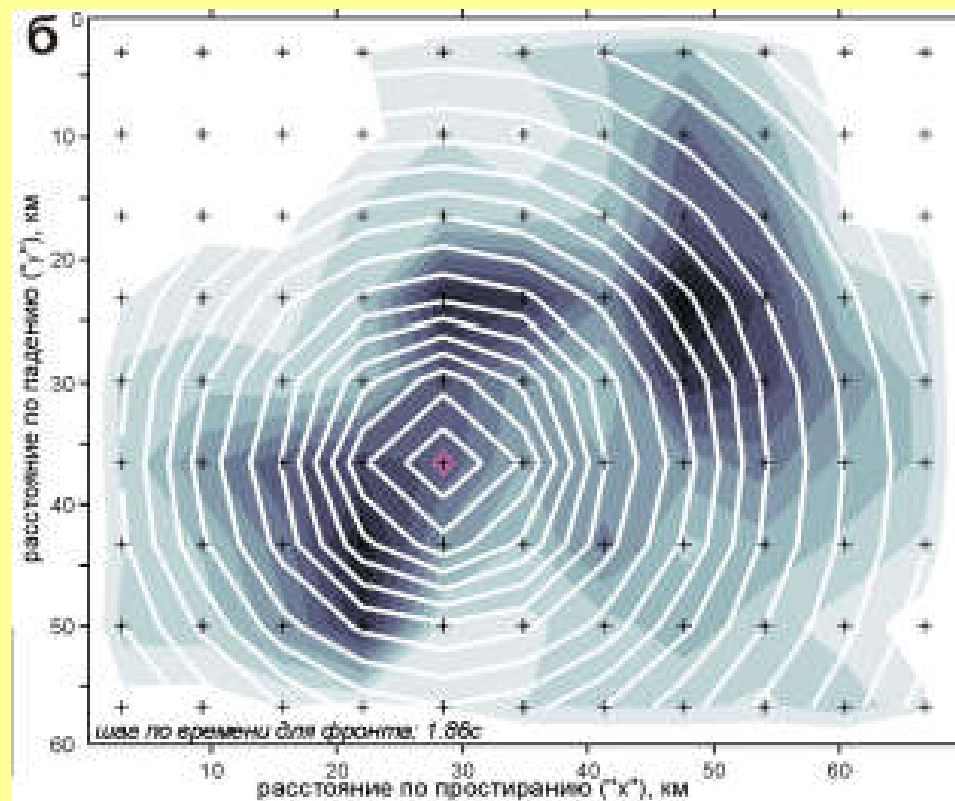
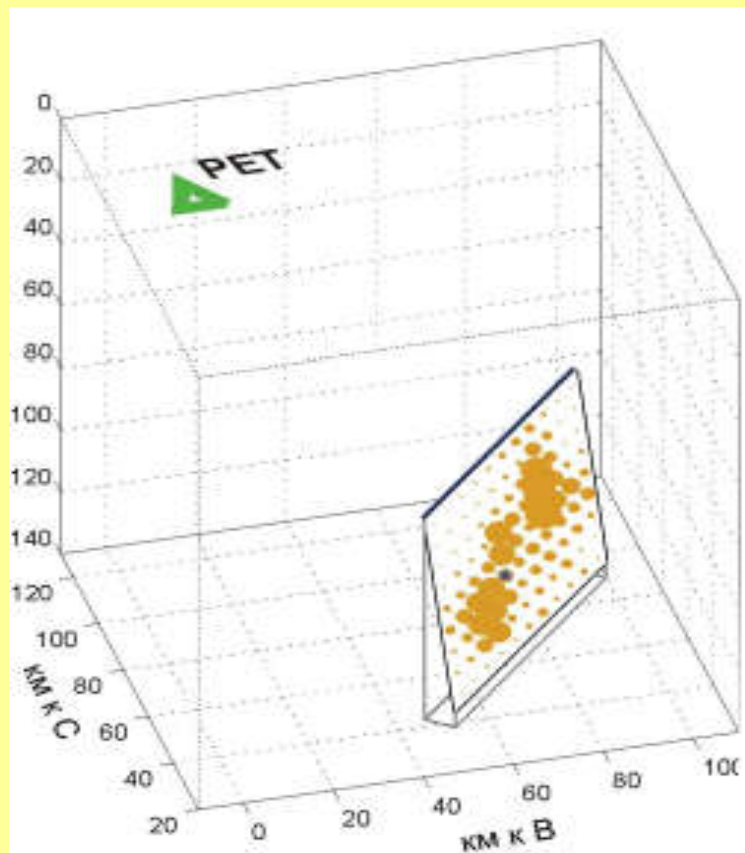
Путем подбора двух параметров в этой формуле удалось успешно промоделировать основные характеристики колебаний грунта: амплитуды ускорения, скорости и смещения грунта, их спектр Фурье, длительность колебаний, спектр реакции.

- Особенностью очага 1971 г. является необычно высокий уровень высокочастотного излучения, вероятно связанный с внутриплитным расположением очага.

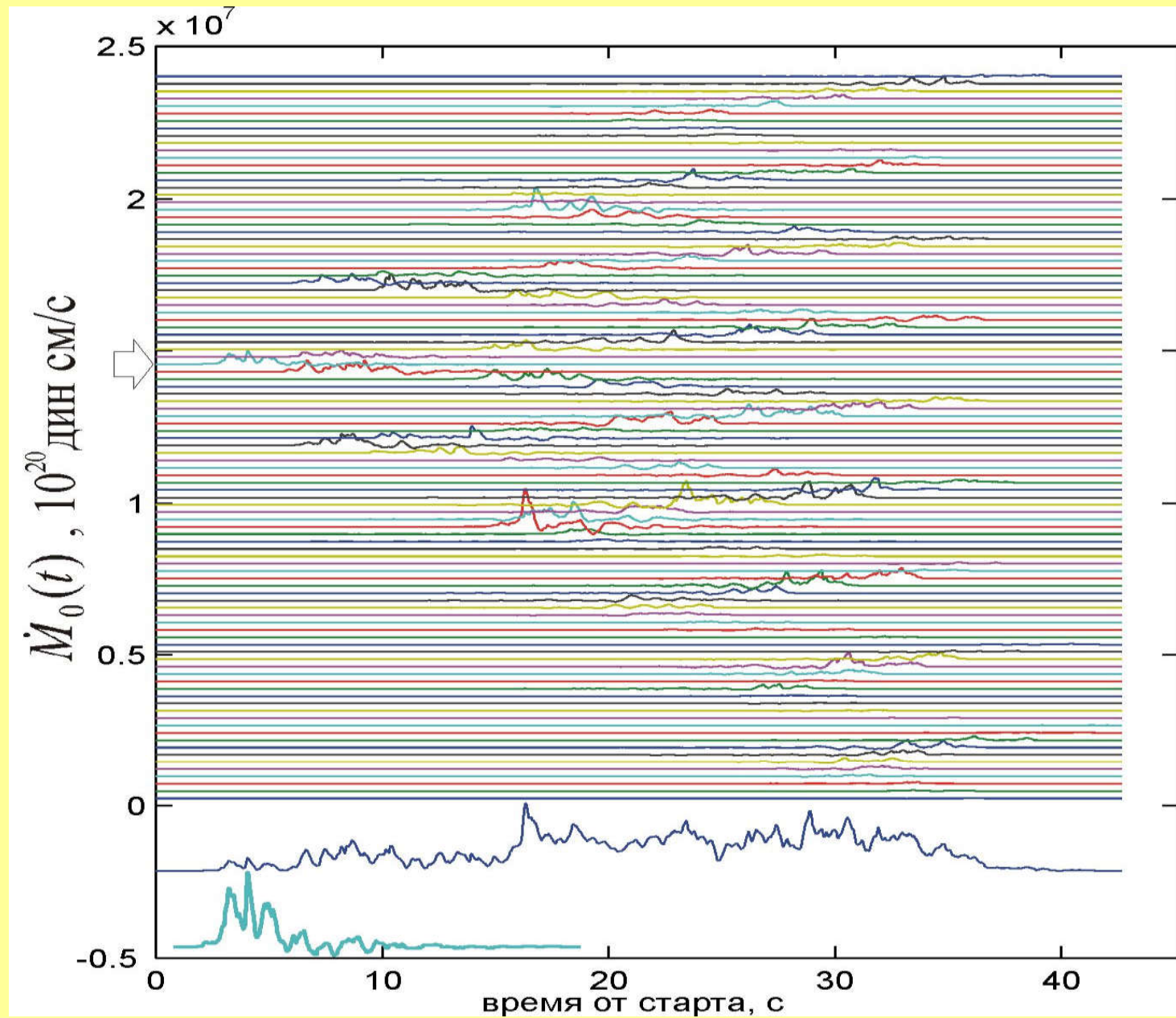
Перспективный вид модели очага; финальная подвижка и история разрыва

модельный очаг:

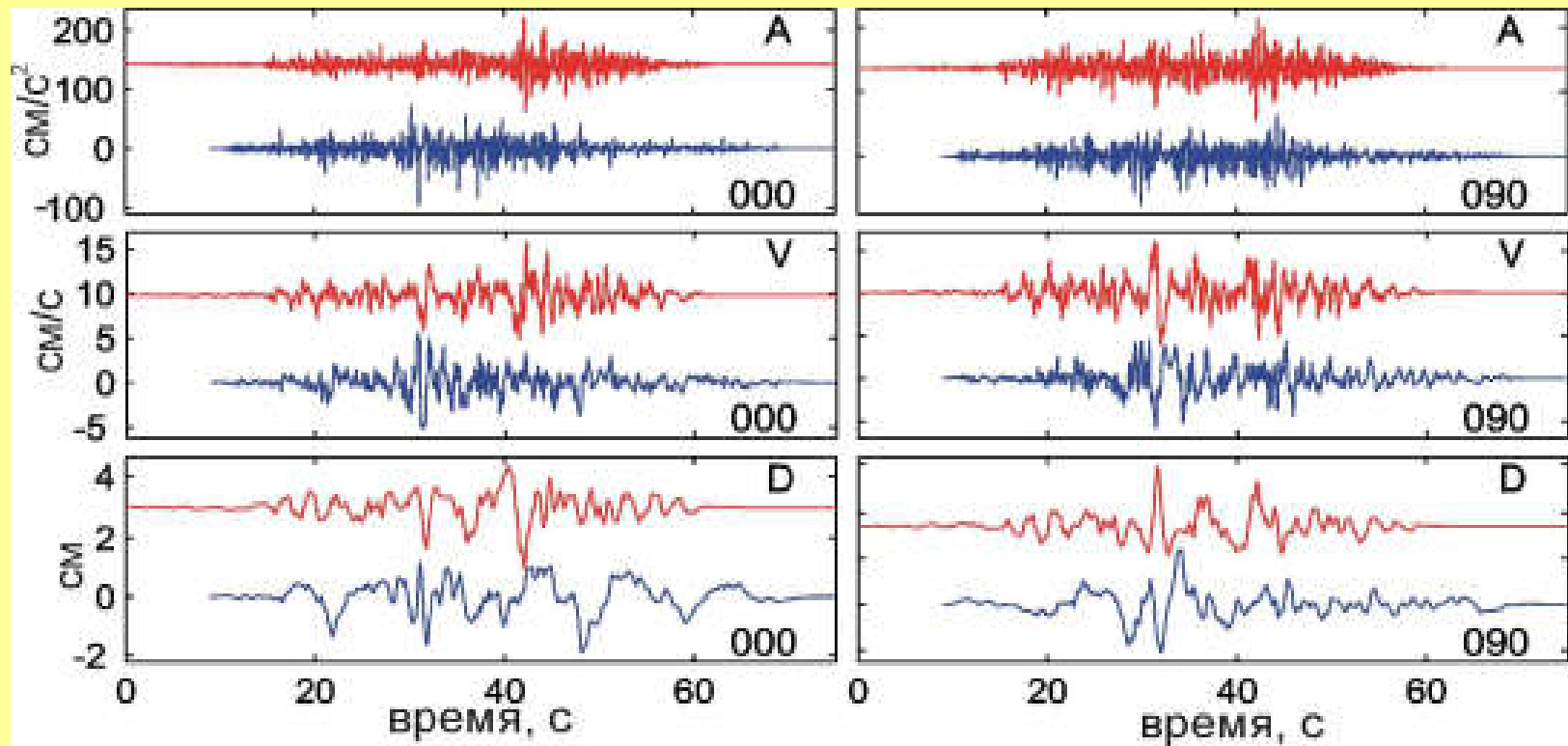
70×60 км, сетка 9×11=99 субисточников, полная длительность 55 с



Временной ход скорости скольжения в каждом из 99 субисточников

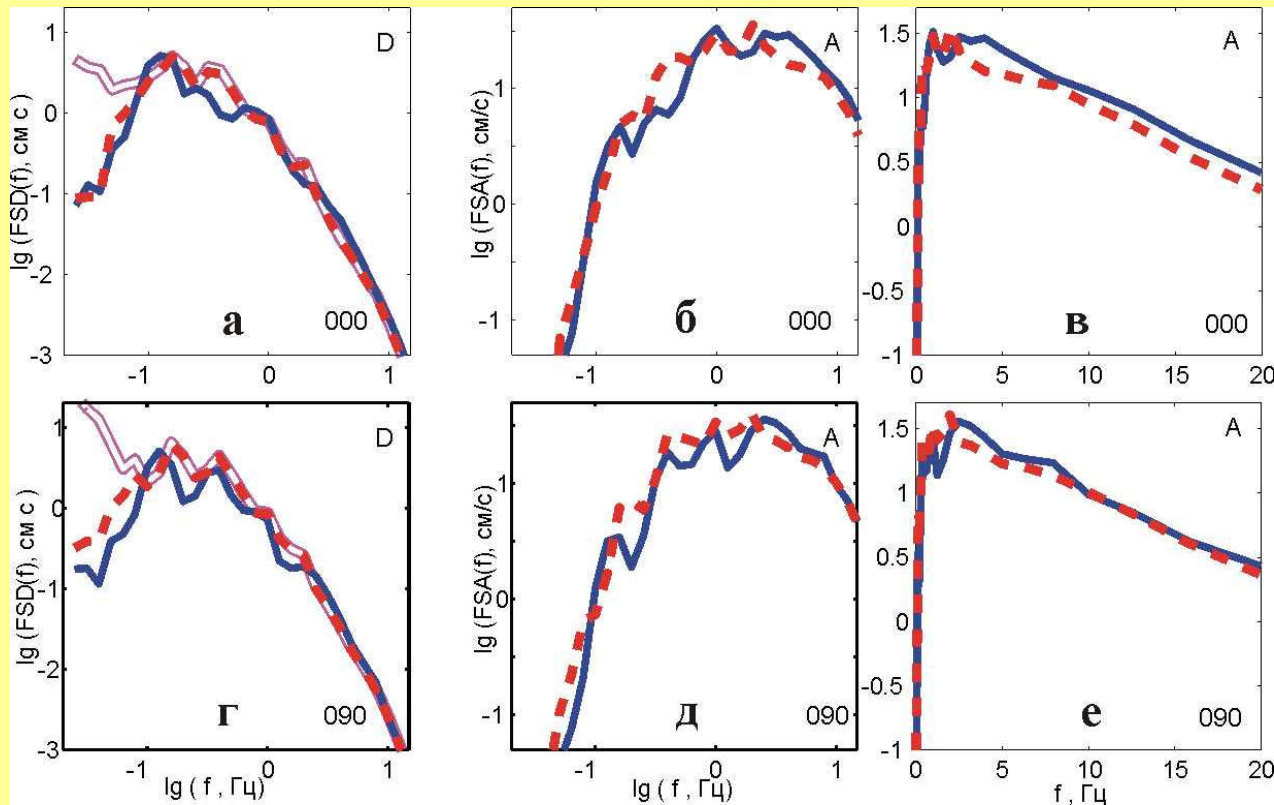


Сравнение **модельного** и **фактического** движения грунта



Задача подгонки деталей движения грунта не ставилась и не решалась
Амплитуды, длительности и общий качественный характер движения
подогнаны успешно

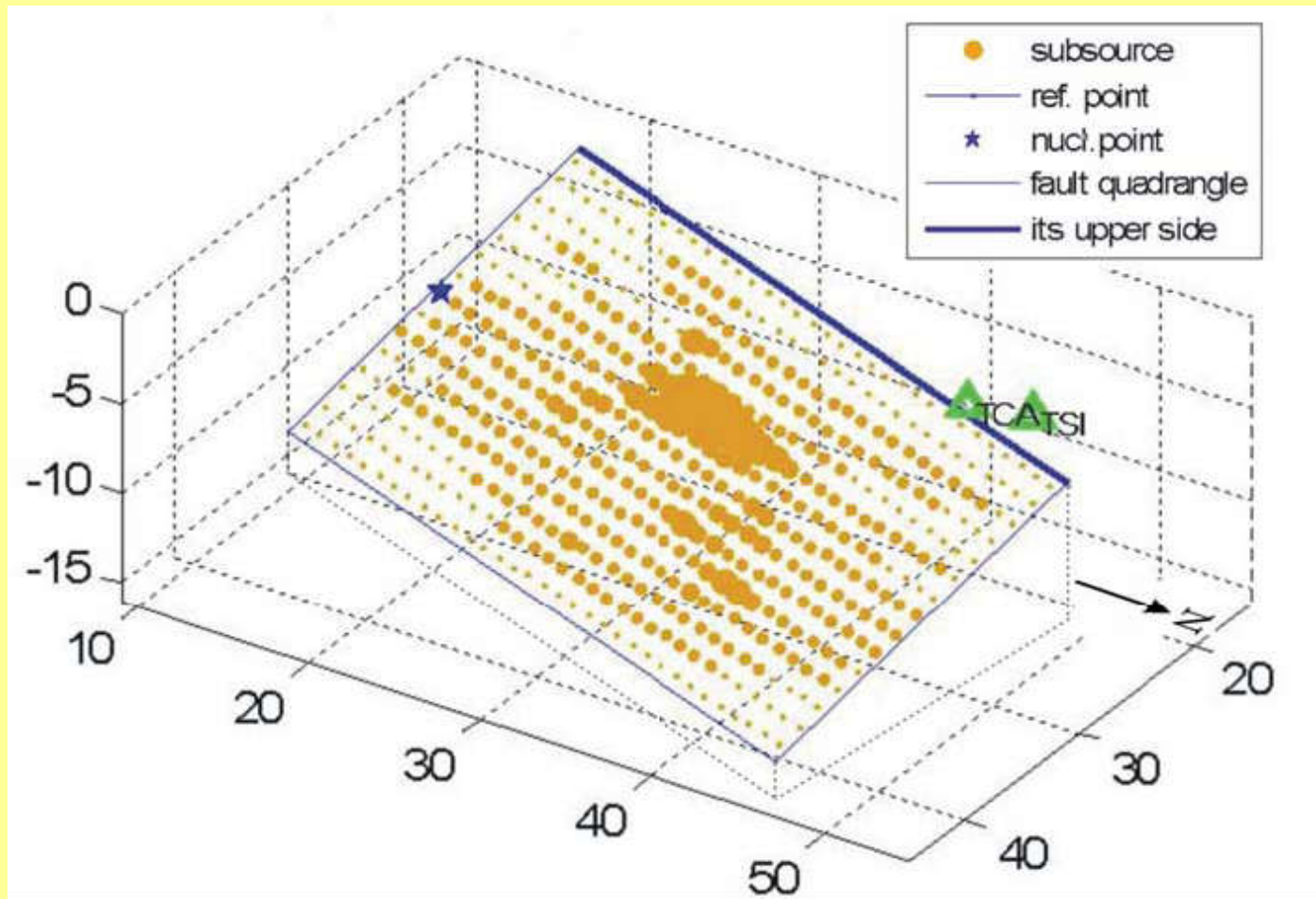
Сравнение **модельного** и **фактического** движения грунта в частотной области (спектры Фурье)



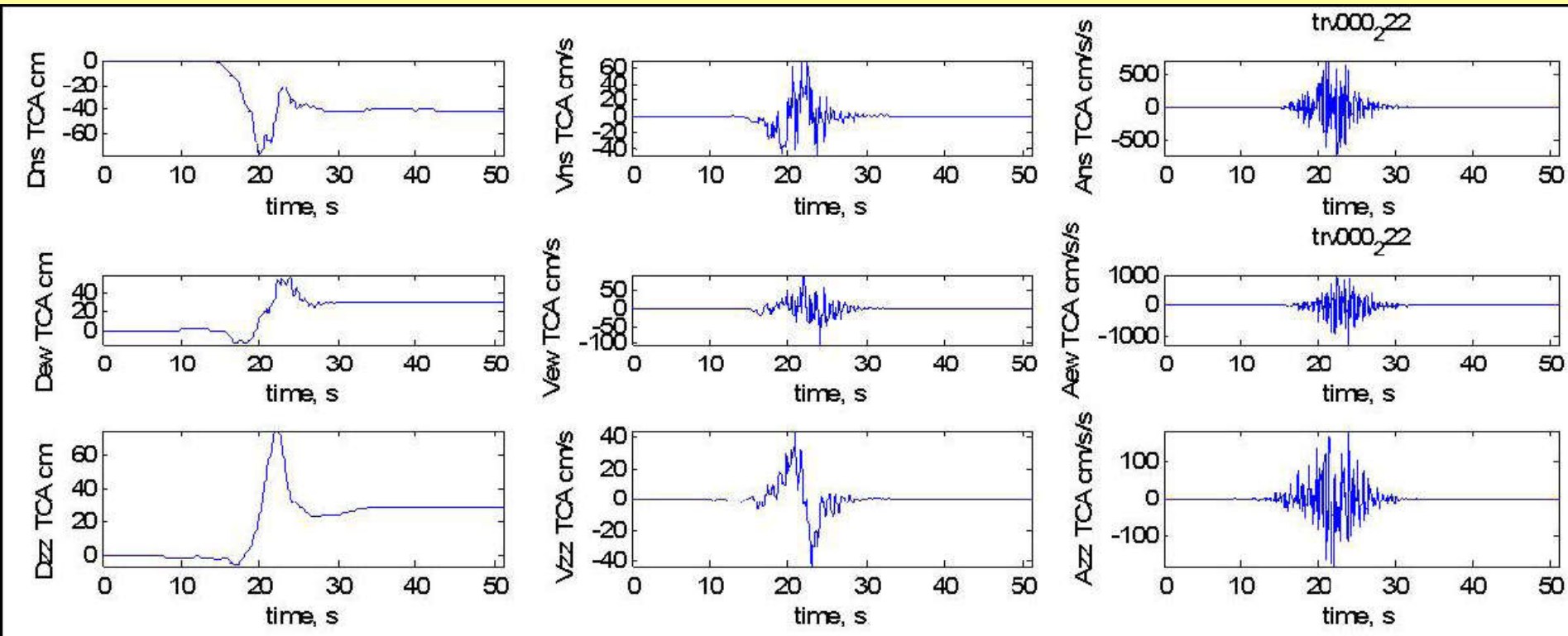
Задача подгонки деталей спектра не ставилась и не решалась

Уровень спектральных амплитуд подогнан успешно от 0.05 Гц до 20 Гц

Messina 1908 M=7



Пример моделированной записи



Примеры модельных акселерограмм

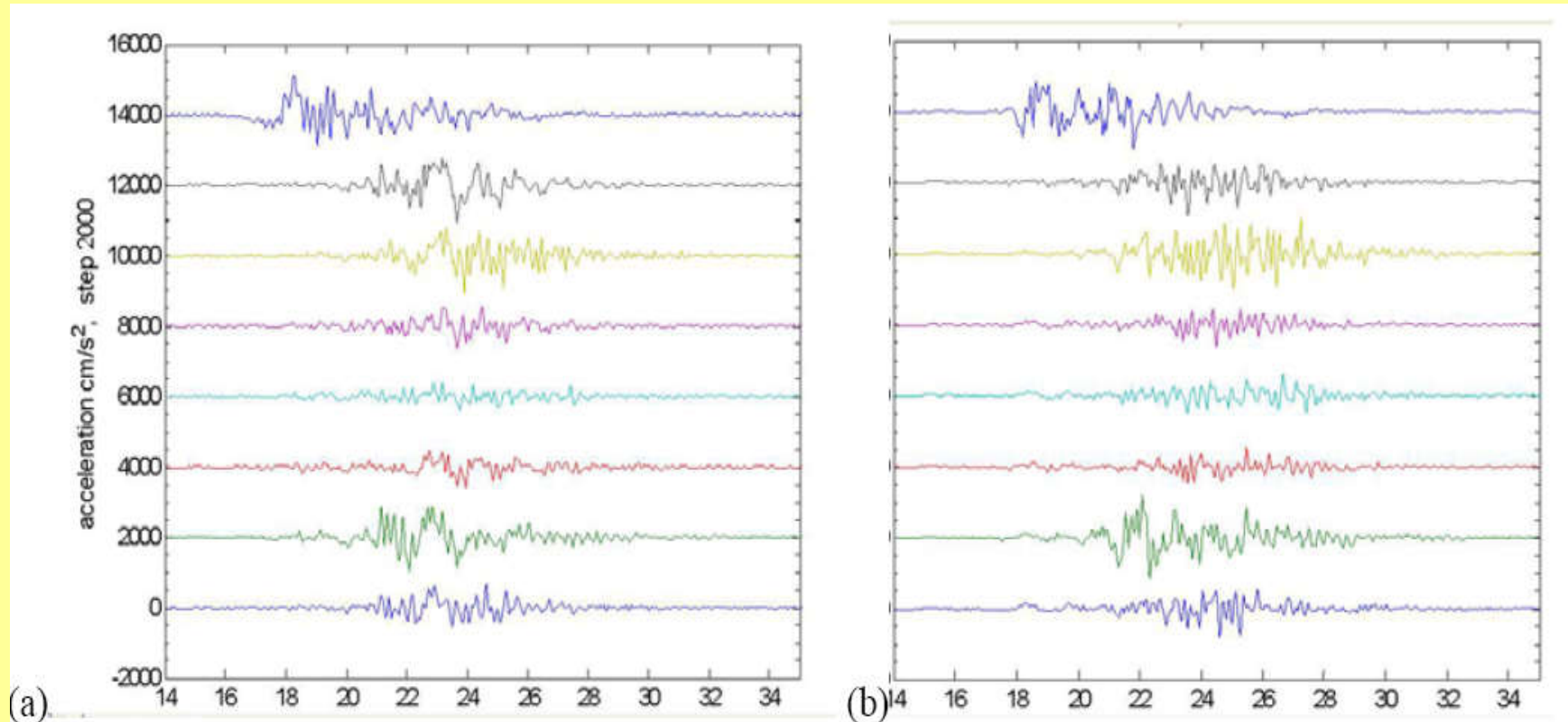
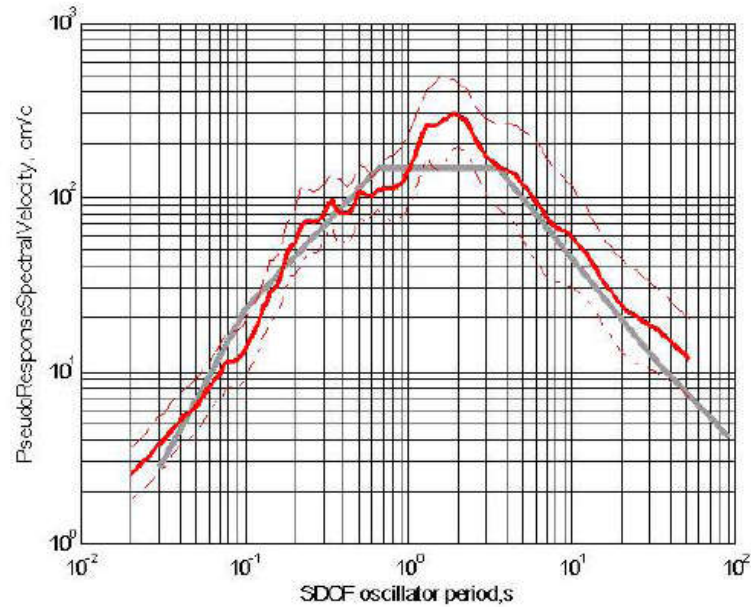


FIGURE 7. Eight sample functions of the ground acceleration at Torre Sicilia for the horizontal components: (a) NS and (b) EW. Vertical interval between zero-lines of traces is 2000 cm/s^2 . The first trace is for the less usual source sample function, when a large asperity happened to coincide with the spot with the highest permitted propagation velocity.

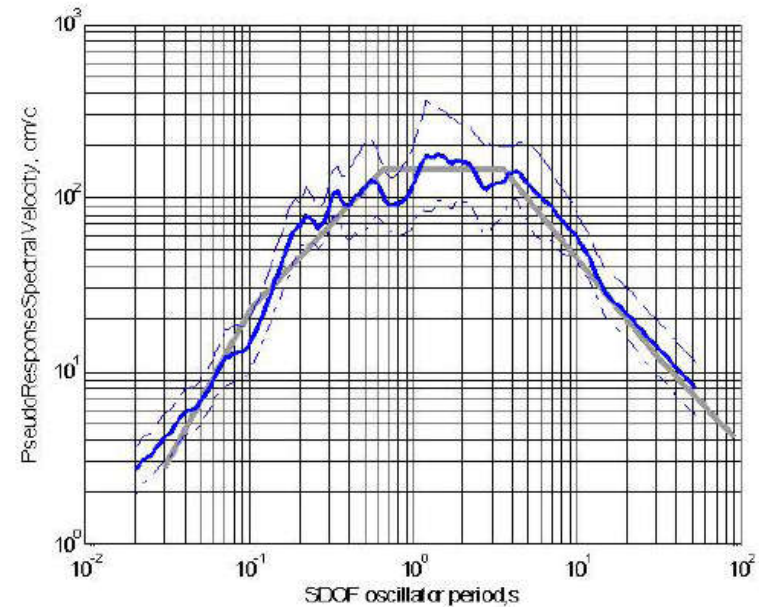
Спектры реакции – средние модельные, разброс, сравнение с рекомендациями другой группы

Torre Sicilia:

N



E



Вывод

- Разработана новая методика для моделирования сильных движений грунта в широкой полосе частот.
- В методике используются сейсмологически обоснованные модели излучателя-очага и упругой среды.
- Методика успешно опробована на нескольких примерах

Максимальные скорости и ускорения для афтершоков Олюторского землетрясения 20.04.2006, приведенные к $R=25$ км и скальному грунту.

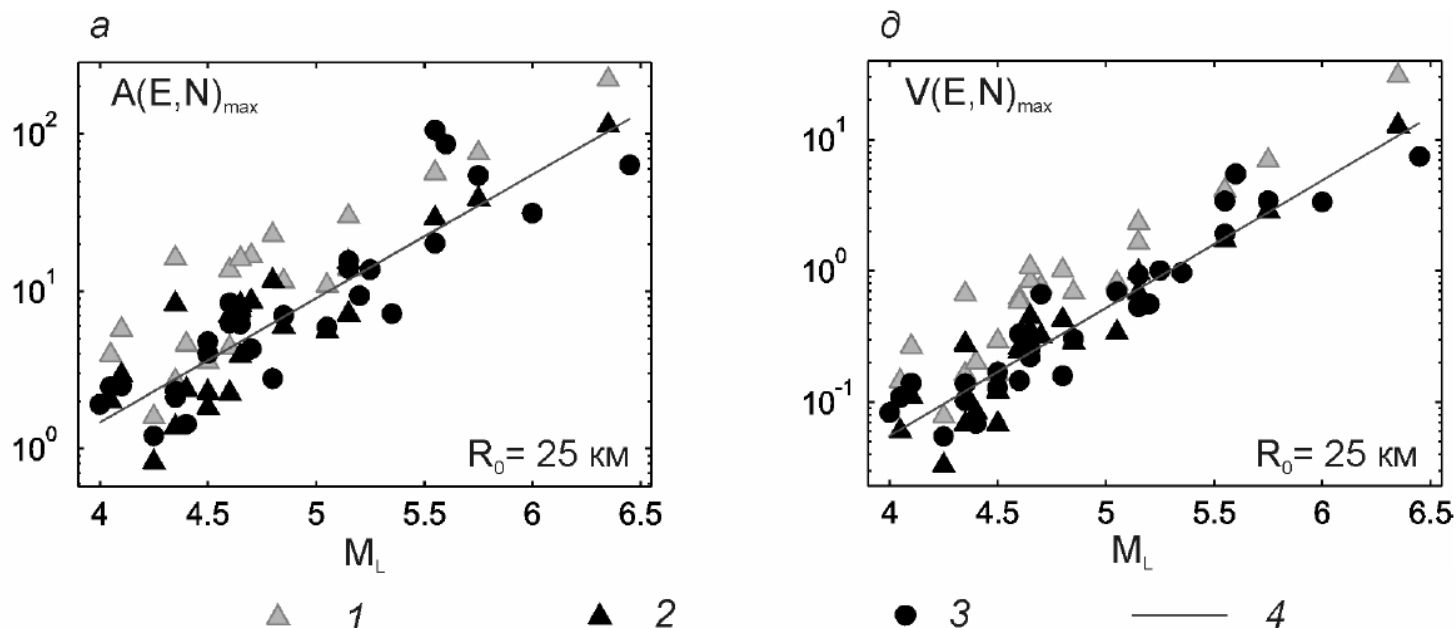


Рис 6.1. Зависимость максимальных амплитуд ускорения (слева, в cm/s^2) и скорости (справа, в cm/s) горизонтальных колебаний грунта от магнитуды. Используется локальная магнитуда $M_L = 0.5 K_S - 0.75$, где K_S - энергетический класс по С.А. Федотову. Амплитуды приведены к единому фиксированному гипоцентральному расстоянию 25 км, а также к грунтовым условиям сейсмостанции КАМ (плотный скальный грунт) путем введения станционной поправки. 1- данные сейсмостанции TLC без станционной поправки; 2- то же с учетом станционной поправки; 3- данные сейсмостанции КАМ; 4 – линии регрессии.

