

**А. А. Гусев**

**Моделирование движения грунта при  
Петропавловском землетрясении 24.11.1971: новая  
методика моделирования сильных движений и ее  
опробование в условиях Камчатки**

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

# Самая общая постановка задачи:

*опробовать ранее разработанную методику оценки движений грунта при сильном землетрясении на реальном примере, для условий Камчатки*

## *Часть 1. Краткое описание методики расчета модельных движений грунта .*

**Цель методики:** оценка сейсмической опасности; конкретно: создание вариантов возможных опасных движений грунта.

**Моделируемые движения грунта** используют в инженерных расчетах в качестве инерционных силовых воздействий, которым должно противостоять проектируемое сооружение.

**В отличие** от чисто эмпирических подходов, методика опирается на сейсмологическую основу и использует детально разработанное описание очага-излучателя

**Методика** позволяет определить степень неопределенности результатов (например – модельных амплитуд ускорения грунта). Неопределенность включает два вклада: ограниченность наших знаний и природный разброс свойств очагов землетрясений

Специфические требования:

- применимость на **малых удалениях** от разлома-очага и для очагов **больших магнитуд**
- широкая **полоса** моделируемых **частот** (0,03-25 Гц) (широкий диапазон периодов колебаний).

Принятое ограничение: - для скальных грунтов

## ***Часть 2. Выбор модели очага Петропавловского землетрясения 24.11.1971 и моделирование излучения сейсмических волн этим очагом; подбор параметров очага для согласия с наблюдаемым движением грунта («подгонка»).***

Цель работы: убедиться, что новая система моделирования сильных движений способна генерировать модельные записи, близкие к наблюдаемым.

**Слово «подгонка» (*fitting*) не следует понимать по-школьному; оно означает: согласовать предсказания модели с наблюдениями путем подбора параметров модели.**

**Вообще, во многих случаях практической работы:**

- либо не удастся достичь приемлемого согласия**
- либо для достижения согласия нужно неразумно большое число параметров**

**В идеале подбираемых параметров вообще нет; но такие ситуации не характерны для геофизики**

***Критерии успешной «подгонки» в нашем случае:***

**согласие** модельных и реальных **амплитуд** скорости и ускорения грунта,

**согласие** амплитудных **спектров** (и по форме, и по амплитуде спектров)

**согласие** модельных и реальных записей в отношении **длительности** колебаний и общей структуры и формы огибающих

**небольшое число параметров**, значения которых подбираются при подгонке; подобранные значения должны быть в пределах обычного разброса.

Общий подход к сейсмологически обоснованному моделированию движения грунта:

**(1) Описать очаг-излучатель волн**

**(2) Описать распространение волн:**

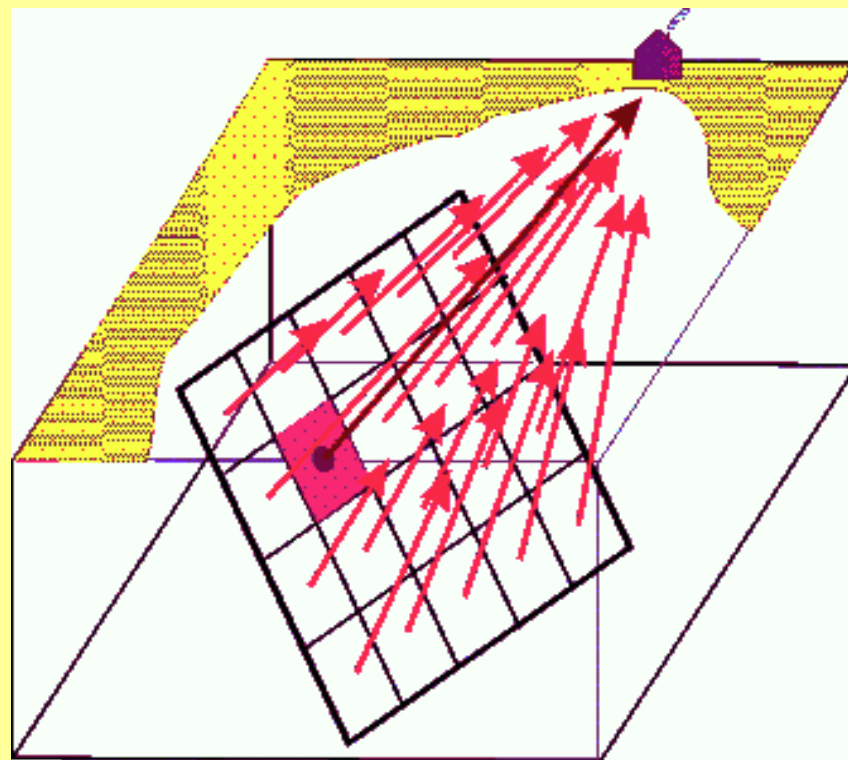
**2а – в твердой Земле**

**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 упругой среды в виде слоистого полупространства



# Последовательность моделирования

- ***А. Очаг***

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

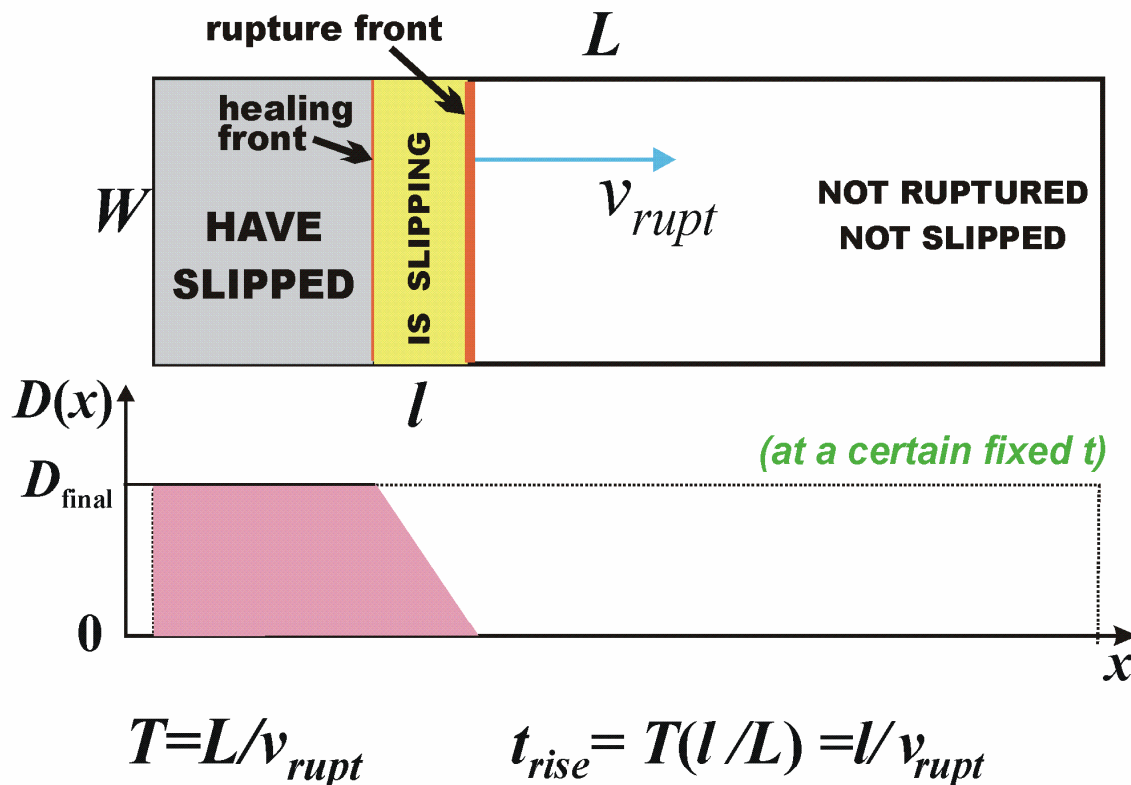
- ***Б. Среда***

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

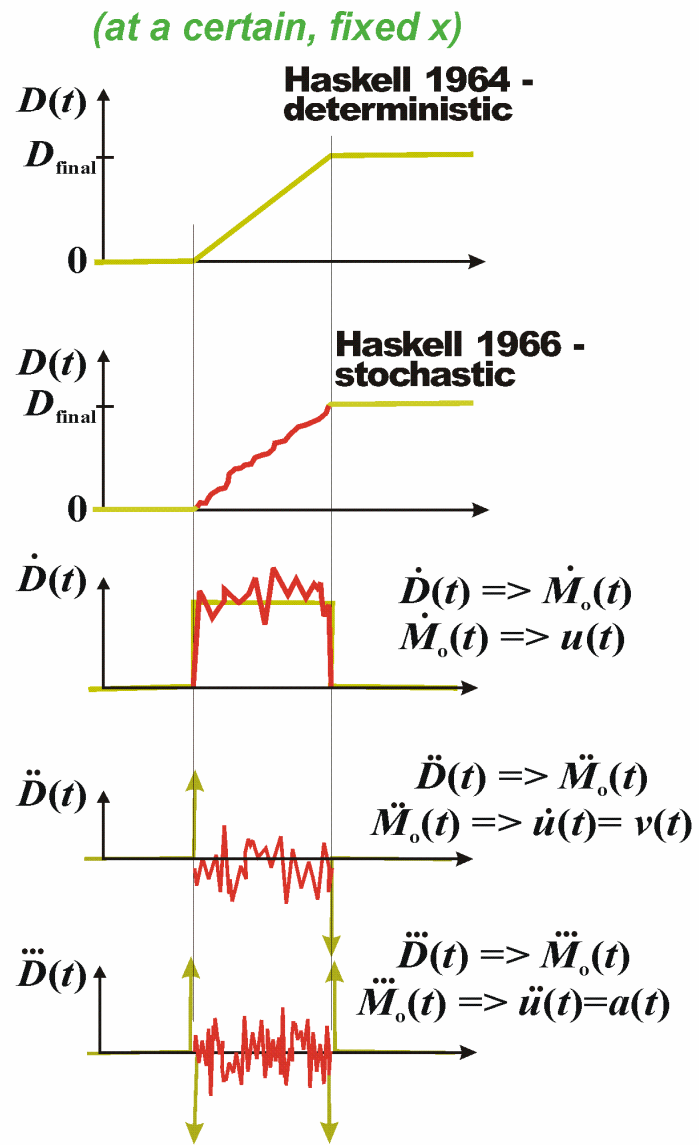
- ***В. Объединение вкладов очага и среды***

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  $D(x,y)$
- (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**.  
В основной версии методики принято, что 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**  $\Delta\sigma$ ,  
задается через 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 **гипоцентра (точки  
зарождения разрыва)**

**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]

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

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

**параметры слоистой среды**

упругие ( $v_S(h)$ ,  $v_P(h)$ ,  $\rho(h)$ )

неупругие ( $Q_S$ ,  $Q_P$ )

# Процедура моделирования

## Б. 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  $|k| = (k_x^2 + k_y^2)^{0.5}$ :

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

[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

## Б. 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

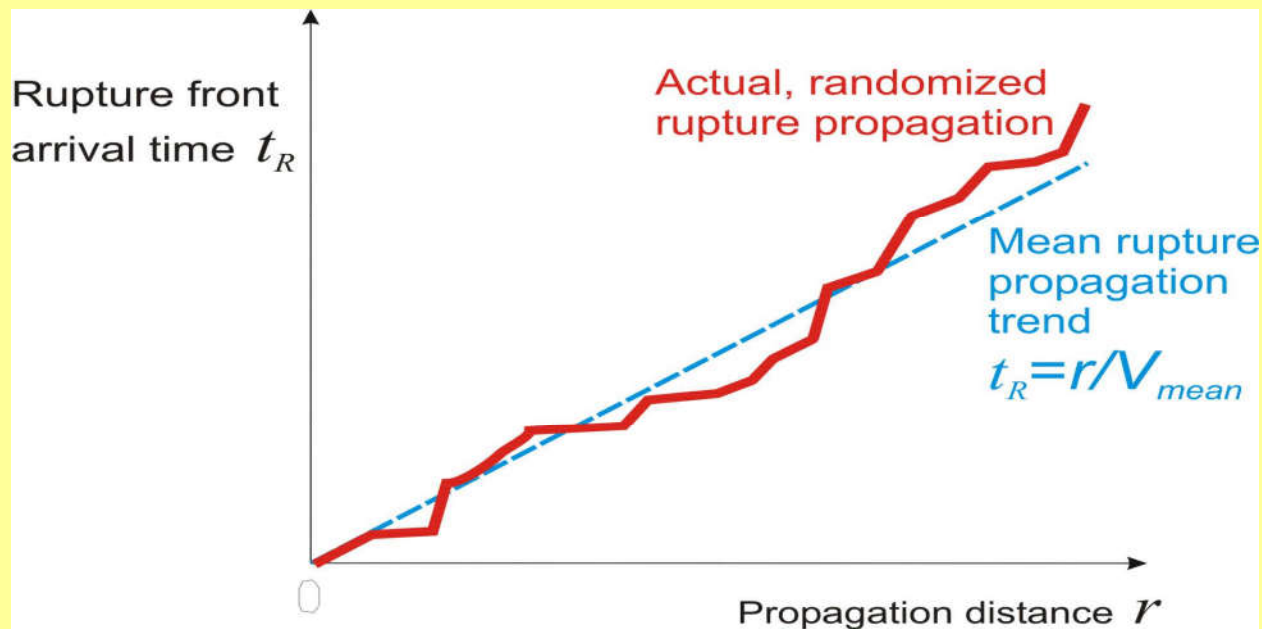
## В. Моделирование истории распространения разрыва

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.

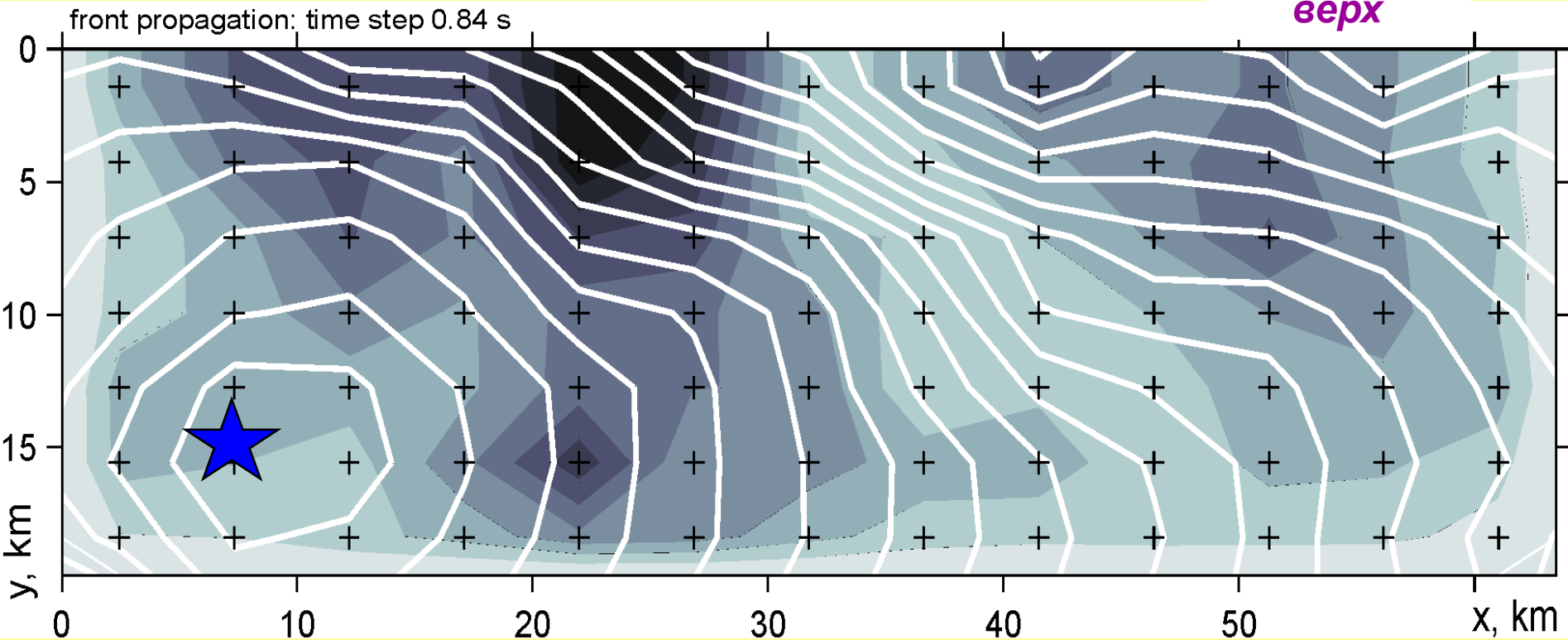
Модель 1: Круговые фронты, скорость варьирует вдоль радиуса

Модель 2: Искривленные фронты, определяются заранее заданным двумерным случайным полем скорости



# 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  $13 \times 7$ .  
[ ось y - по падению; ось x – по простиранию ]

# ПЕРЕДЫШКА

**Итак, мы уже описали**

- (1) «силу» (сейсмический момент) каждого субочага
- (2) временной ход фронта разрыва  
и тем самым порядок включения субочага

**Дальше нужно :**

задать временной ход каждого индивидуального субочага

# Процедура моделирования

## Г. 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

## Г. 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)

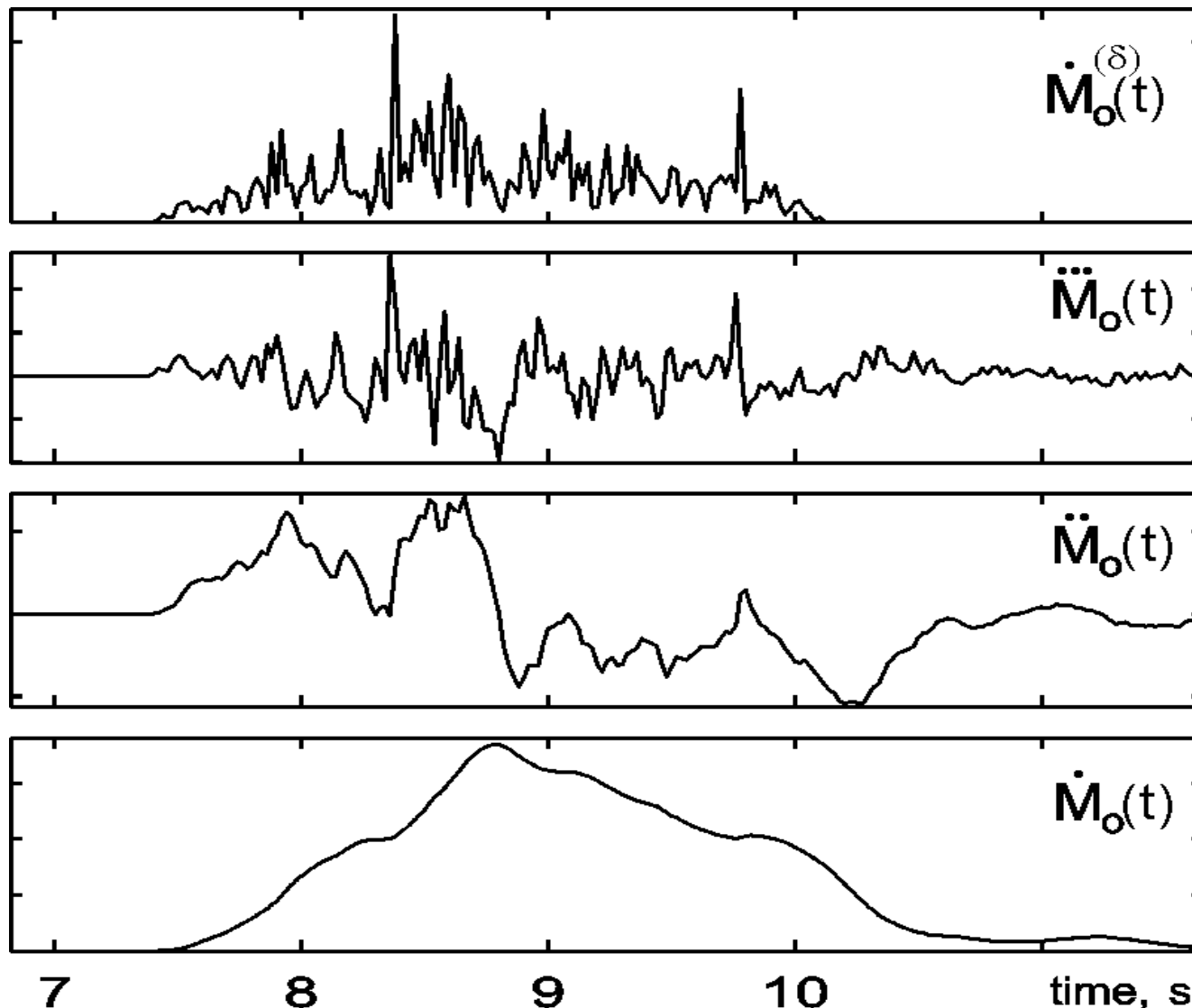


**Процедура моделирования**  
**Г. Моделирование временного хода локальной подвижки**  
**для субисточника (3)**

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.

# Пример модельного временного хода индивидуального субисточника



сегмент приблизительно  
белого шума  
(положительный, с  
заданной огибающей)

[до коррекции спектра]

-----  
окончательный вариант:

“ускорение”

“скорость”

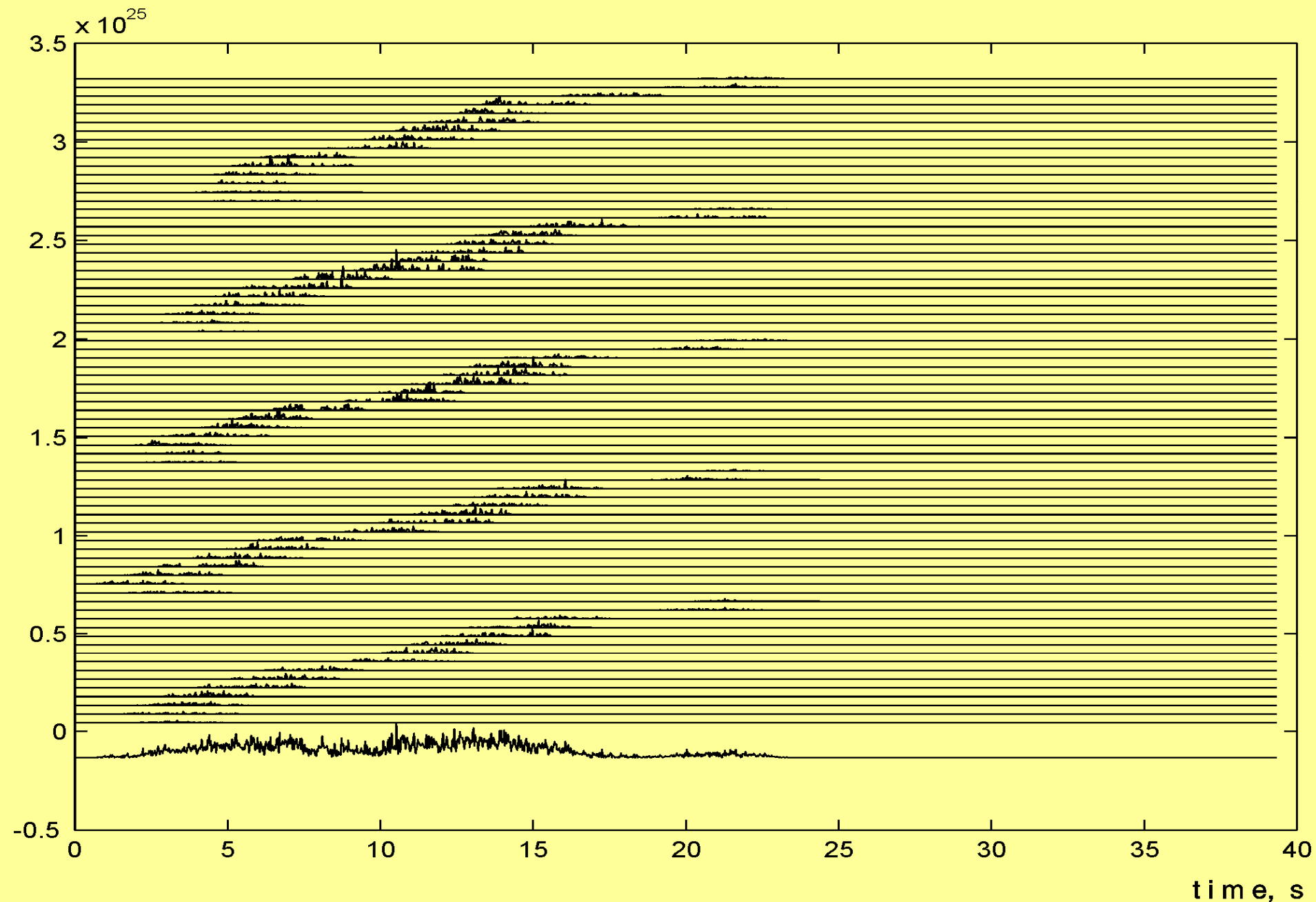
“смещение”

(скорость изменения  
сейсмического  
момента)

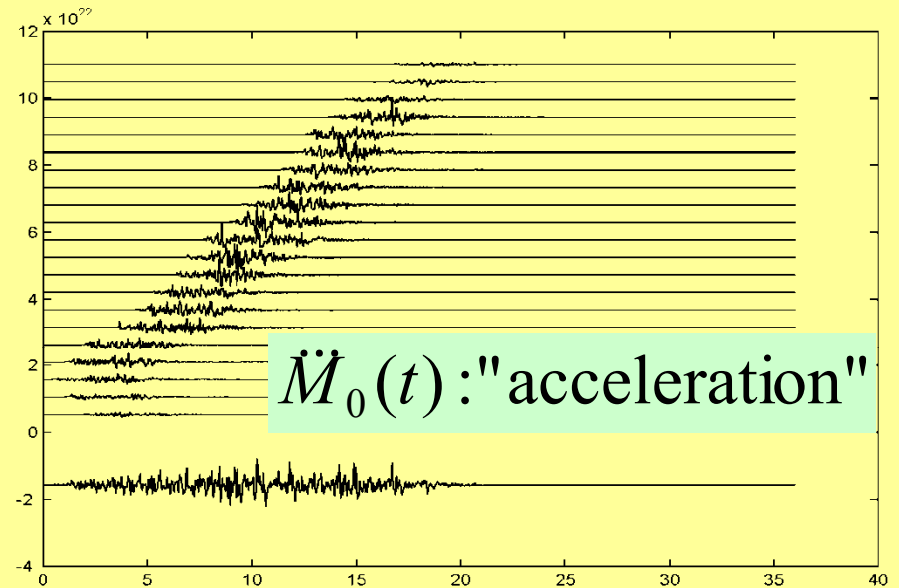
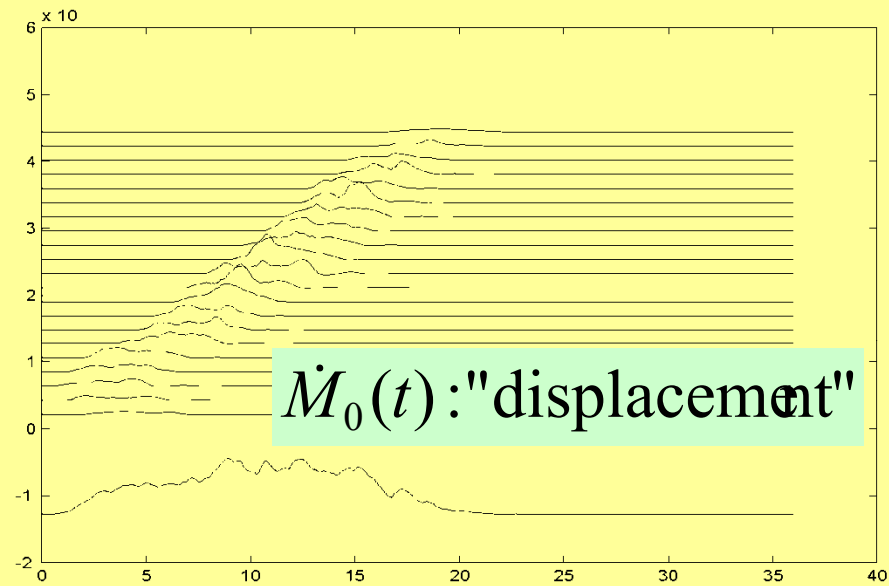
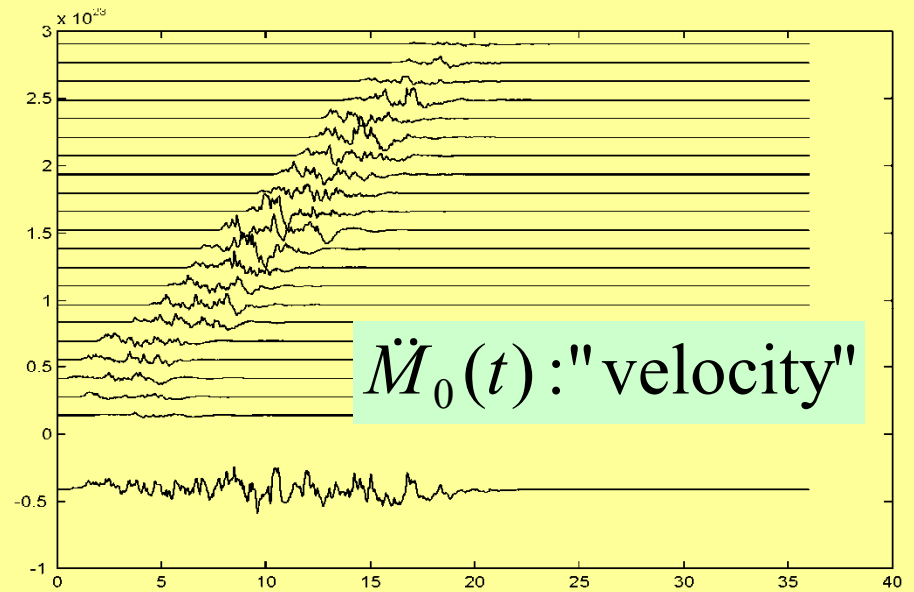
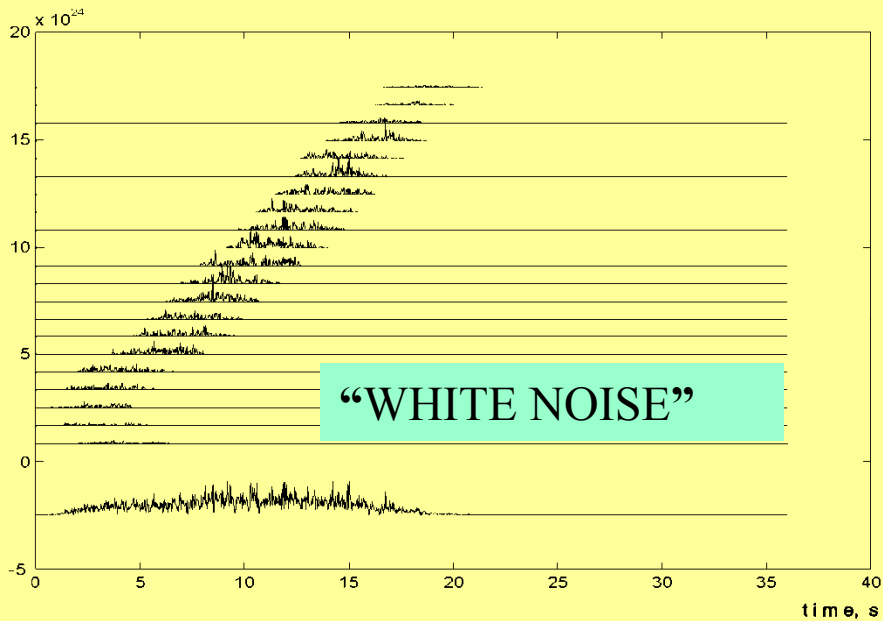
Длительность функции окна  $2 \times (\text{время нарастания}) = 3.8 \text{ s}$ .

# Временной ход 75 субисточников («белый шум»)

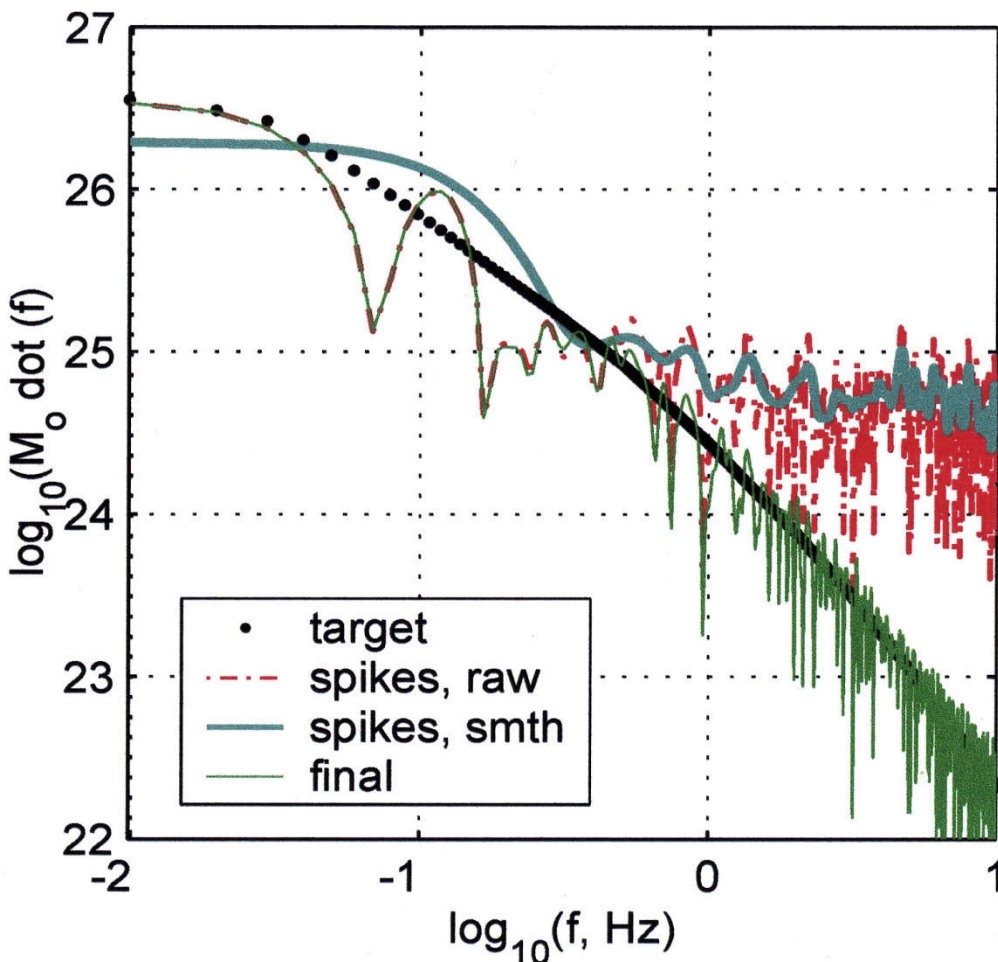
(для модельного очага с сеткой субисточников 15x5)



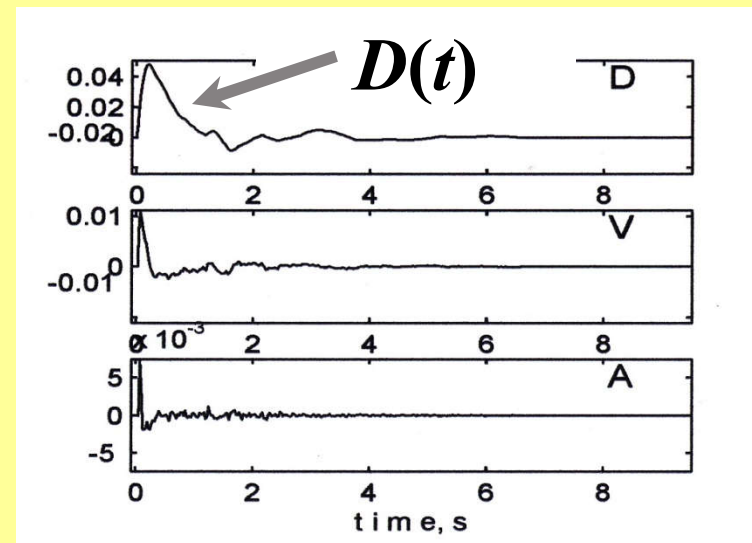
# Временной ход 21 субисточника для линейной модели очага (сетка 21x1)



$\dot{M}_0$  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 моделирования временного хода амплитуд S-волн в дальней зоне в однородной среде: направленность излучения

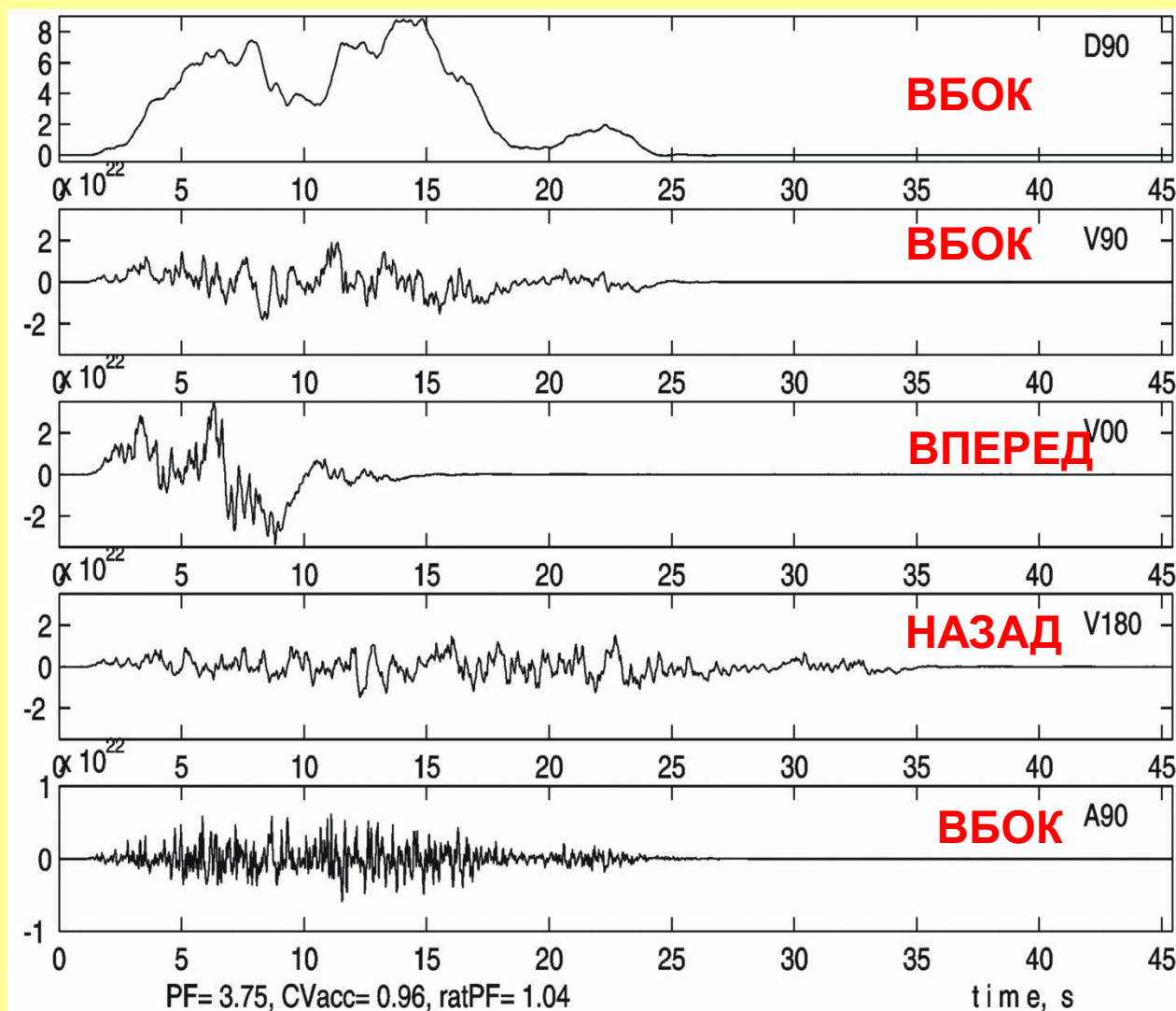
D,  $Az=90^\circ$   
(ББОК)

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 землетрясения 1971 г.***

*Часть 2. Выбор модели очага Петропавловского землетрясения 24.11.1971 и моделирование излучения сейсмических волн этим очагом; подбор параметров очага для согласия с наблюдаемым движением грунта («подгонка»).*

*Критерии успешной «подгонки» в нашем случае:*

**согласие** модельных и реальных **амплитуд** скорости и ускорения грунта,

**согласие** амплитудных **спектров** (и по форме, и по амплитуде спектров)

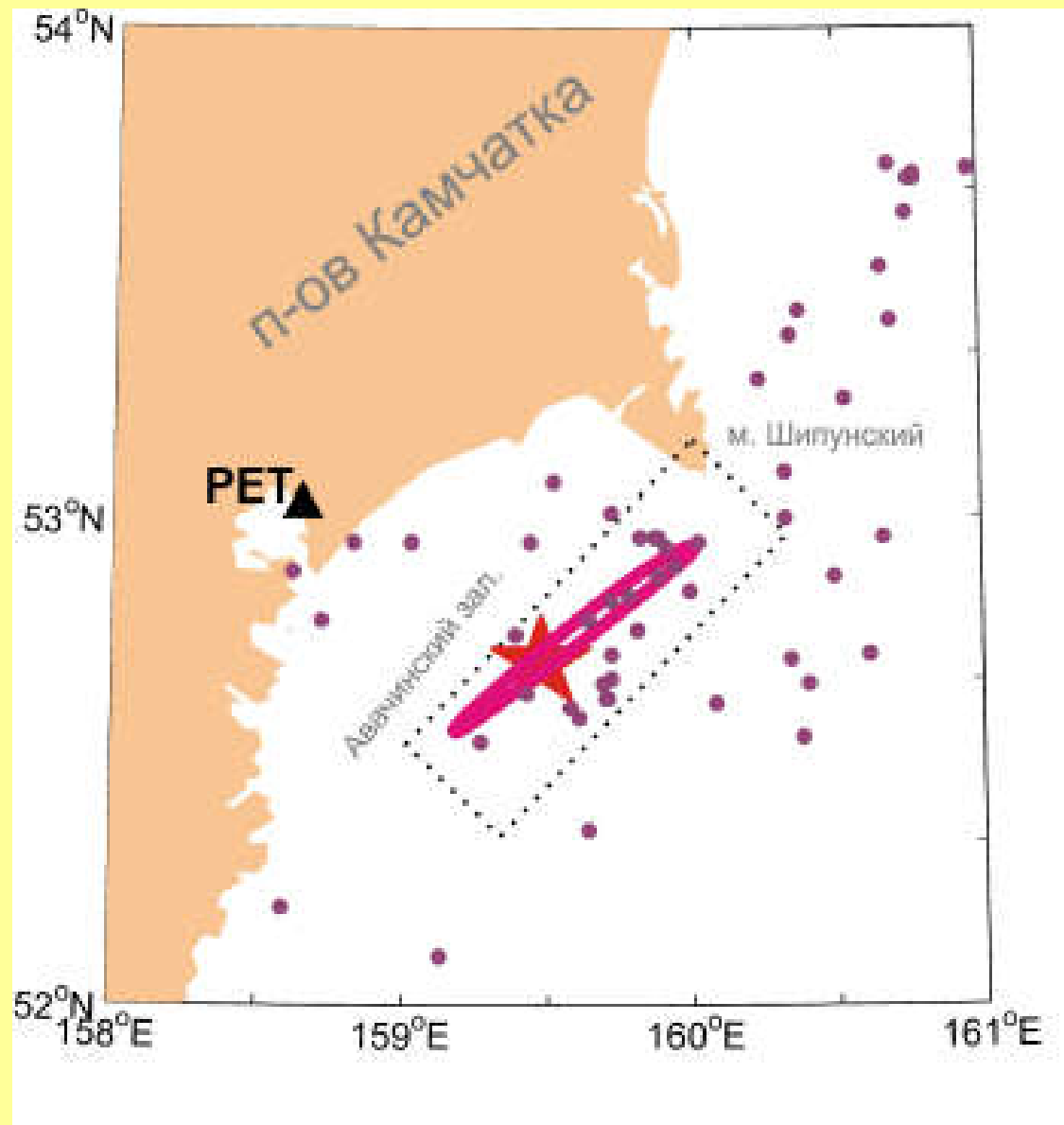
**согласие** модельных и реальных записей в отношении **длительности** колебаний и общей структуры и формы огибающих

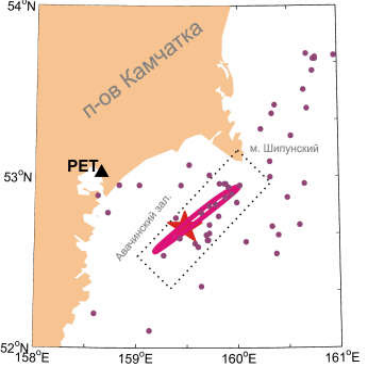
**небольшое число параметров**, значения которых подбираются при подгонке; подобранные значения должны быть в пределах обычного разброса.



# Петропавловское землетрясение 24(25)ноября 1971г

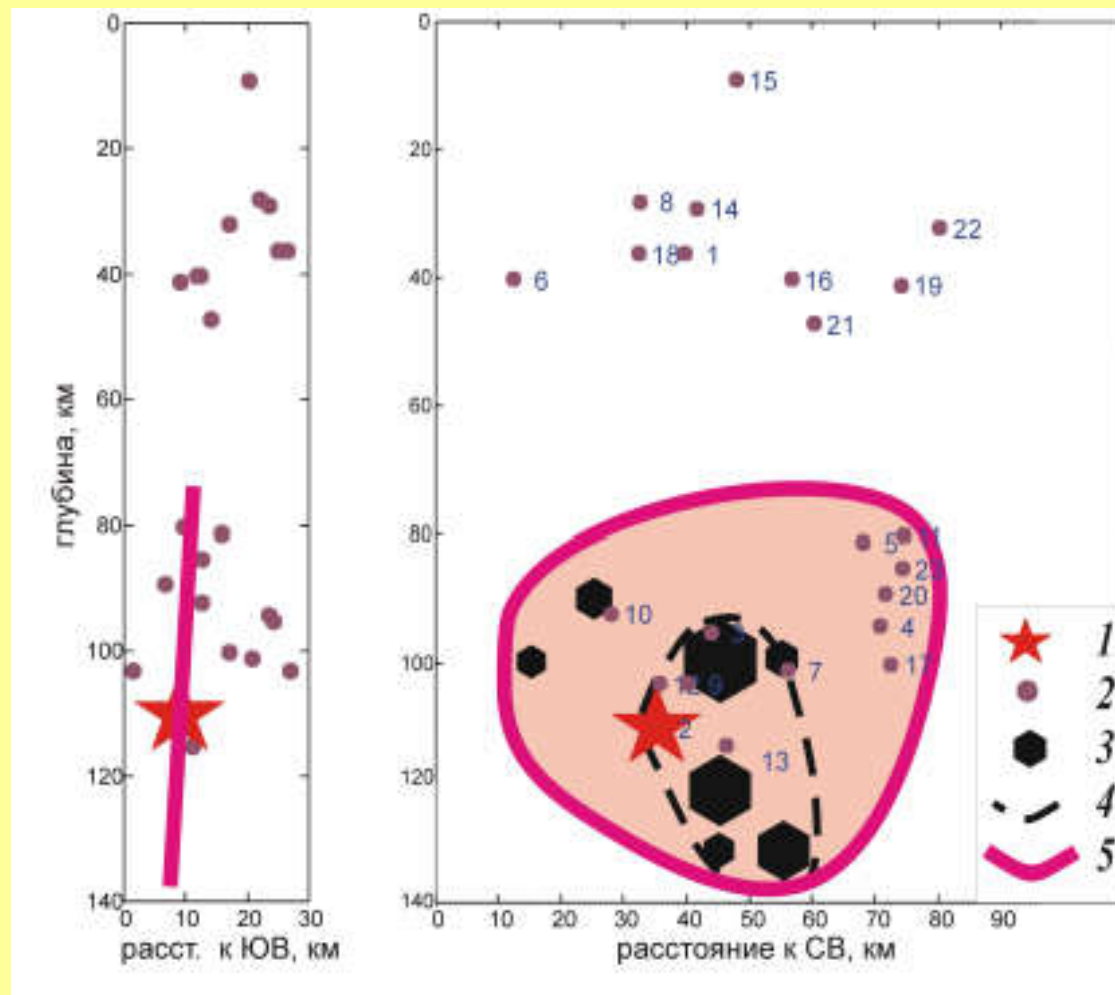
(сильные движения записаны прибором С5С-ИСО на сейсмостанции «Петропавловск»)





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

- 1-гипоцентр основного толчка,
- 2 – гипоцентры: форшока (номер 1, опережение 24 мин) и афтершоков за первые 2 месяца;
- 3 – субочаги – компоненты очагового процесса по [Fukao&Kikuchi 1987]
- 4 – область очага к концу 15 с по FK87;
- 5 – площадка очага, принятая в данной работе.



Зона ВЗБ

Вглубь океанич. плиты



# Способы и результаты практического моделирования

- Считали известными заранее:
  - сейсмический момент (варианты),
  - положение гипоцентра,
  - размеры и расположение разрыва в пространстве,
  - «механизм очага»(варианты)
  - длительность развития разрыва
- Использованы результаты ряда опубликованных работ. Конкретное значение сейсмического момента, длительность развития разрыва и механизм очага подобраны из диапазона опубликованных вариантов.

# Параметры очага

| источник            | $\lambda, \phi, ^\circ$                        | $h$ , км                            | $L$ , км                       | $W$ , км          | $d$ , с               | $V_r$ , км/с              | $\phi_s$           | $\delta_s$        | $\lambda_s$       | $M_w$          |
|---------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| ГЗКШ75              | 52.7 159.6                                     | 100г                                | 70 <sup>(1)</sup>              | —                 | —                     | —                         | 60                 | 80                | 85                | —              |
| Зобин1984, 1988     | 52.77<br>159.66                                | 100г                                | 30 <sup>(3)</sup>              | 30 <sup>(3)</sup> | 6–8 <sup>(4)</sup>    | 1.2, 4.3 <sup>(5)</sup>   | 40                 | 88                | 110               | 7.3–7.5P, 7.7R |
| ГС82 <sup>(6)</sup> |                                                | 80–120д                             | 140                            | 40                | 53                    |                           | —                  | —                 | —                 | —              |
| FukaoKikuchi 1987   | 52.9 152.2г                                    | 112г<br>95–130д                     | 35–40 <sup>(7)</sup>           | 45                | 14, 50 <sup>(7)</sup> | 1.1                       | 43                 | 83                | 90                | 7.2P           |
| GKSG97              | 52.77<br>159.66г                               | 95ц                                 | —                              | —                 | 12                    | —                         | 165 <sup>(8)</sup> | 10 <sup>(8)</sup> | 40 <sup>(8)</sup> | 7.1P           |
| <b>Наст. работа</b> | <b>52.71<br/>159.47г<br/>52.79<br/>159.59ц</b> | <b>110г<br/>(135–75д);<br/>105ц</b> | <b>70<br/>(40СВ,<br/>30ЮЗ)</b> | <b>60</b>         | <b>35</b>             | <b>[1.2–1.7]<br/>1.67</b> | <b>43</b>          | <b>83</b>         | <b>120</b>        | <b>7.55</b>    |

$\lambda, \phi$  – широта и долгота эпицентра,

$h$  – глубина инструментального гипоцентра(г), центра тяжести или «центроида» (ц) или диапазон глубин протяженного очага (д);

$L$  – горизонтальная протяженность очага и длины его плеч к СВ и ЮЗ от эпицентра (СВ), (ЮЗ);

$W$  – вертикальная протяженность очага, в данном случае почти совпадающая с его шириной,

$d$  – длительность очагового процесса или его этапов;

$V_r$  – скорость испаривания,

$\phi_s, \delta_s, \lambda_s$  – азимут простирания и угол падения принятой плоскости разрыва и соответствующий угол скольжения ;

$M_w$  – моментная магнитуда по волнам Р (Р) или Релея (R).

Примечания. (1) - протяженность цепочки афтершоков. (2)-варианты на основе диапазона глубин афтершоков.

(3) оценка по расстоянию между выраженными субочагами. (4) – относительное запаздывание между субочагами

и (5) оценка скорости на этой основе. (6) очаг предполагается пространственным объектом, включающим

разрывы СВ-ЮЗ и В-З простирания. (7) значения размера и длительности для начального этапа и процесса в

целом. (8) эту (пологую) нодальную плоскость все другие авторы сочли вспомогательной

# Способы и результаты практического моделирования

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

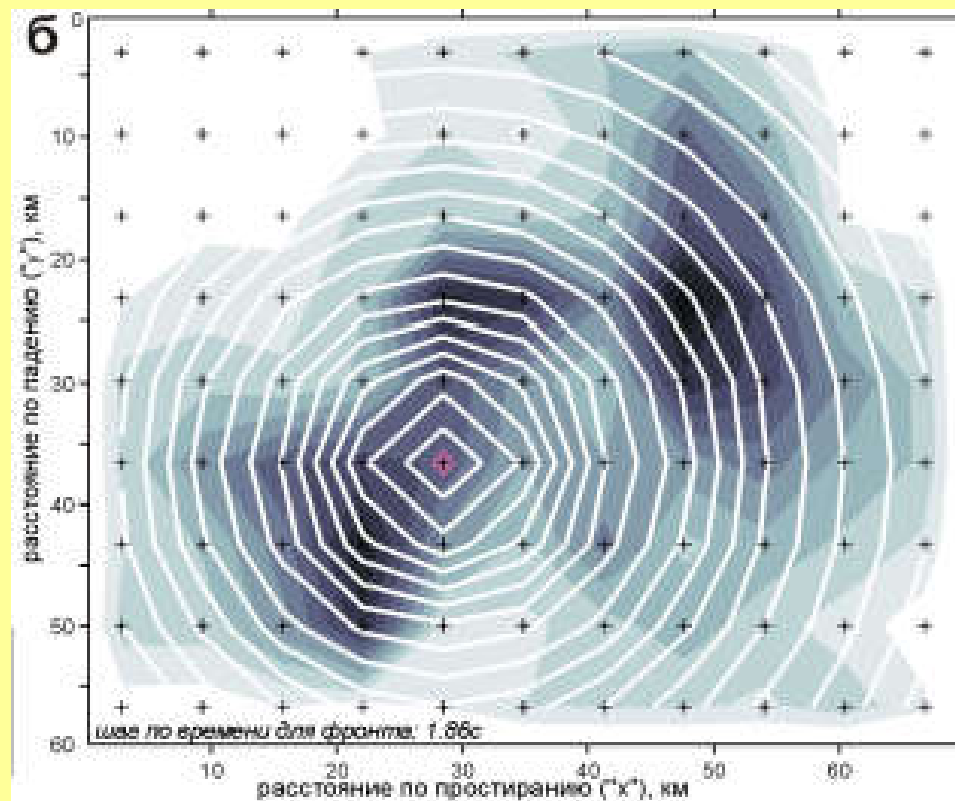
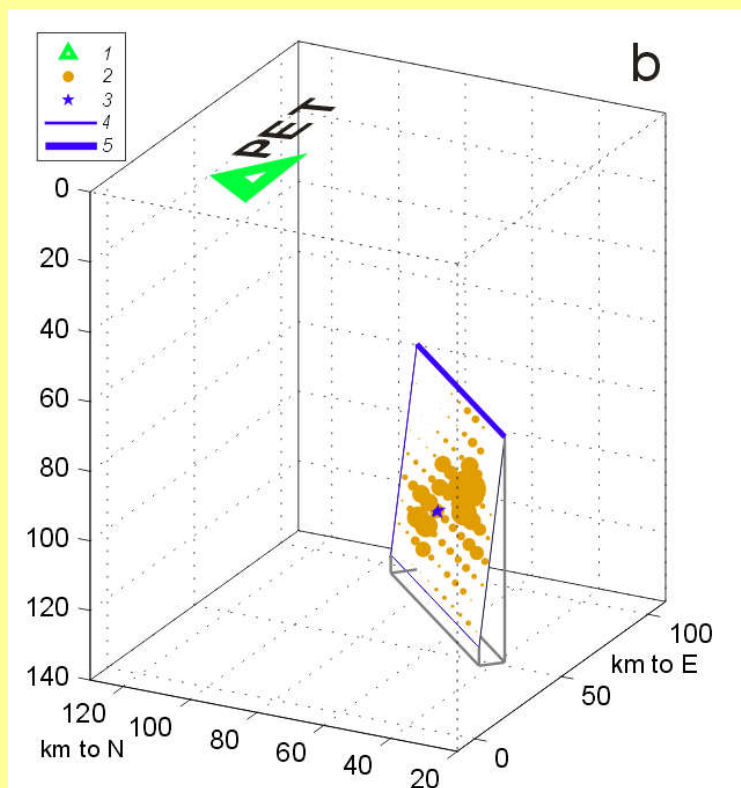
$$\dot{M}_0(f) = M_0 \left[ \frac{(1 - \varepsilon)}{1 + (f / f_a)^2} + \frac{\varepsilon}{1 + (f / f_b)^2} \right]$$

- Путем подбора двух параметров в формуле Аткинсон (1993) удалось успешно промоделировать основные характеристики колебаний грунта:
  - амплитуды ускорения, скорости и смещения грунта,
  - спектр Фурье,
  - длительность колебаний,
  - спектр реакции.
- Особенностью очага 1971 г. является необычно высокий уровень высокочастотного излучения, вероятно связанный с внутриплитным расположением очага.

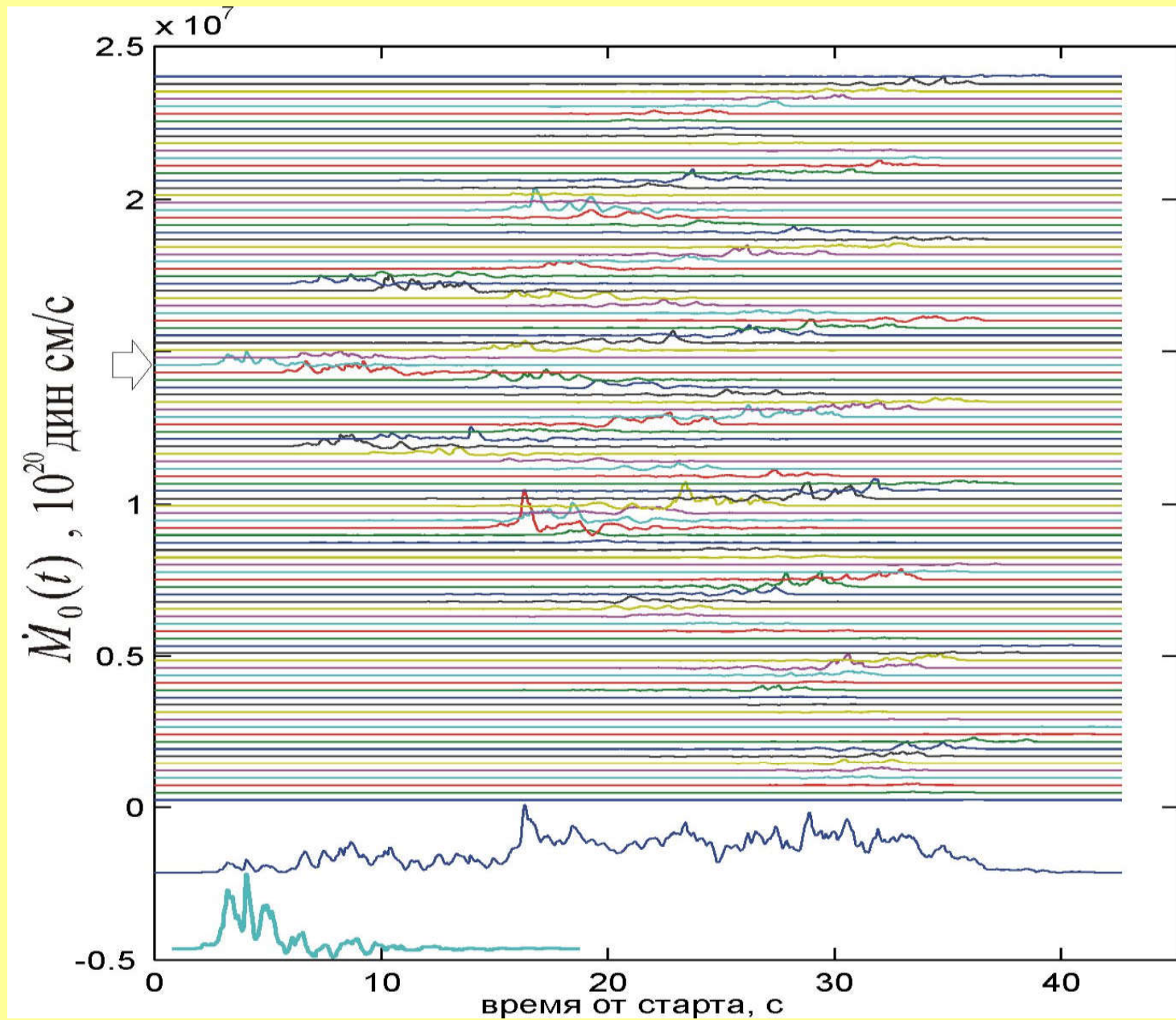
# Перспективный вид модели очага; финальная подвижка и история разрыва

модельный очаг:

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

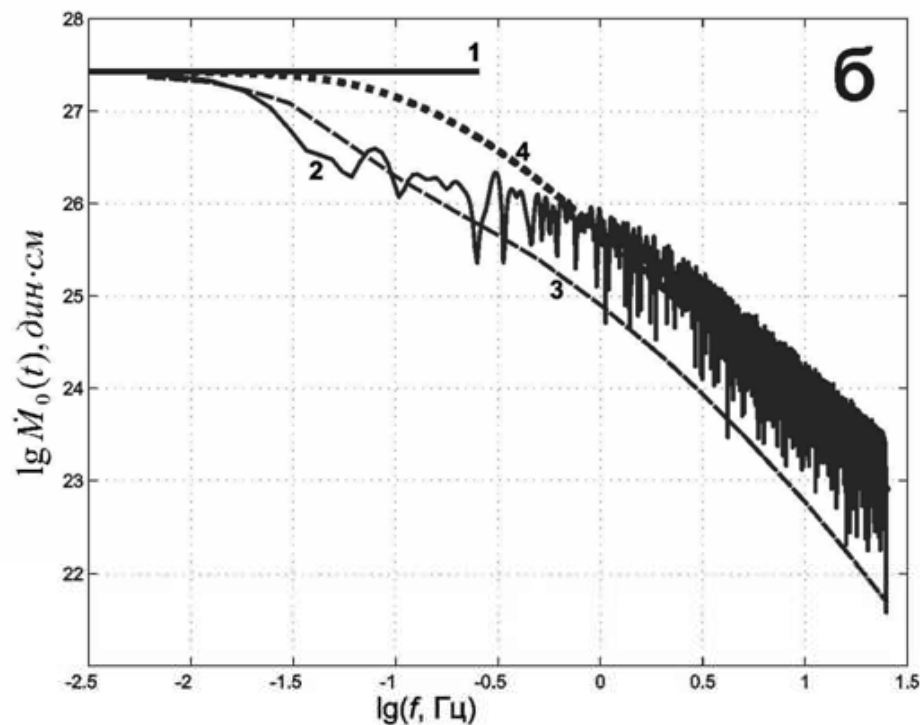
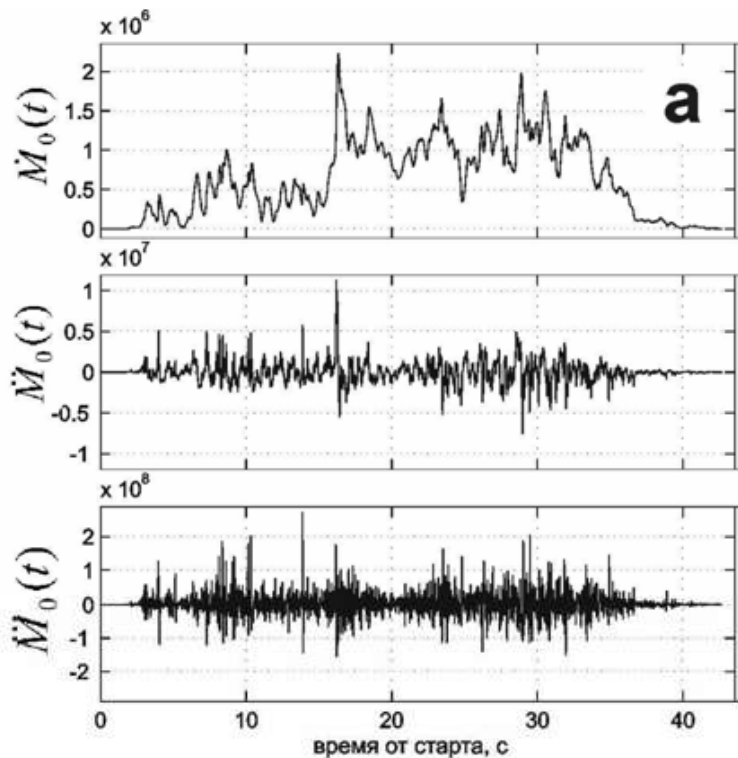


# Временной ход скорости скольжения в каждом из 99 субисточников





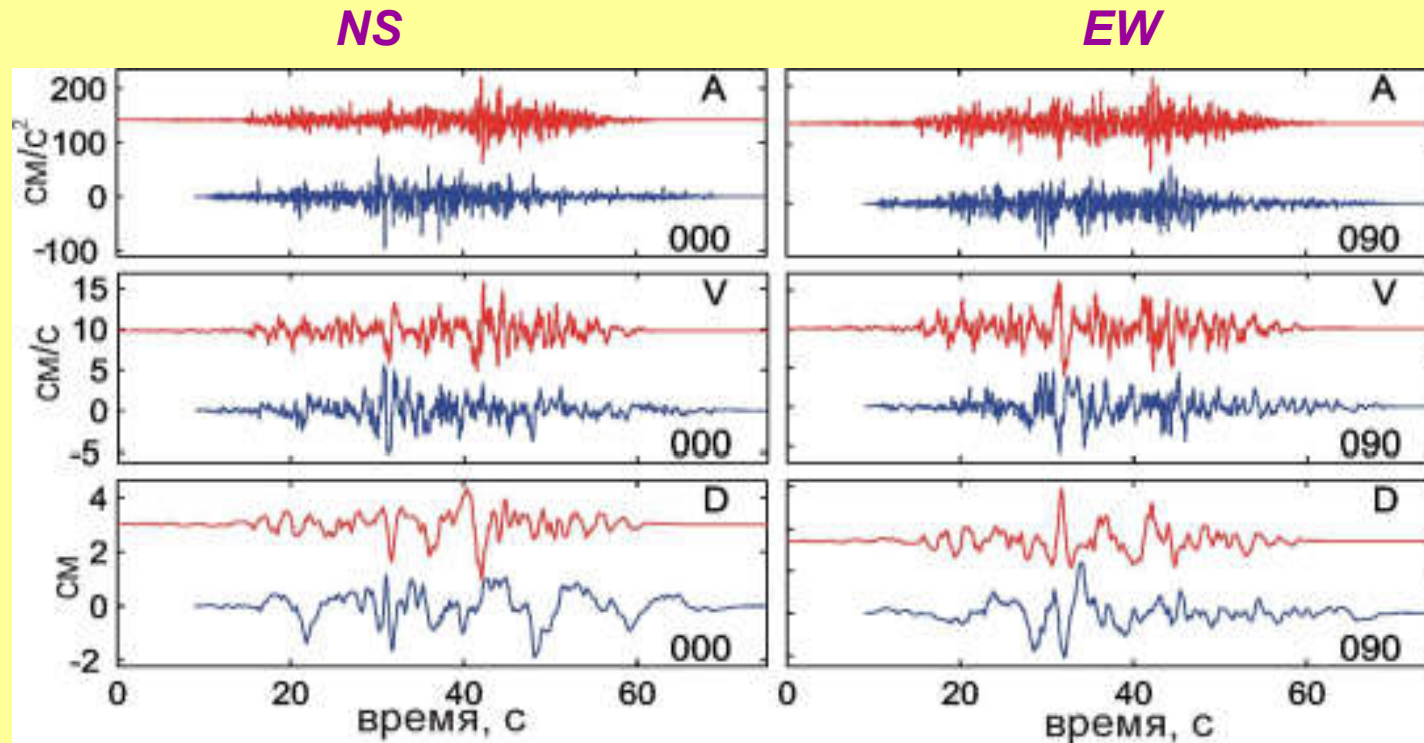
# Суммарные функции источника



Очаговые суммарные временные функции  $\dot{M}_0(t)$  («смещение»),  $\ddot{M}_0(t)$  («скорость») и  $\ddot{\ddot{M}}_0(t)$  («ускорение») (а) и соответствующий амплитудный спектр «смещения»  $|\dot{M}_0(f)|$  (б). 1- спектр мгновенного (дельта) источника с  $M_w=7.55$ ; 2 – спектр модельного сигнала из а. 3 и 4 – спектры очагов с  $M_w=7.55$  согласно семействам средних спектров Гусева (Г83, Г84) и Бруна, последний в варианте J84.



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



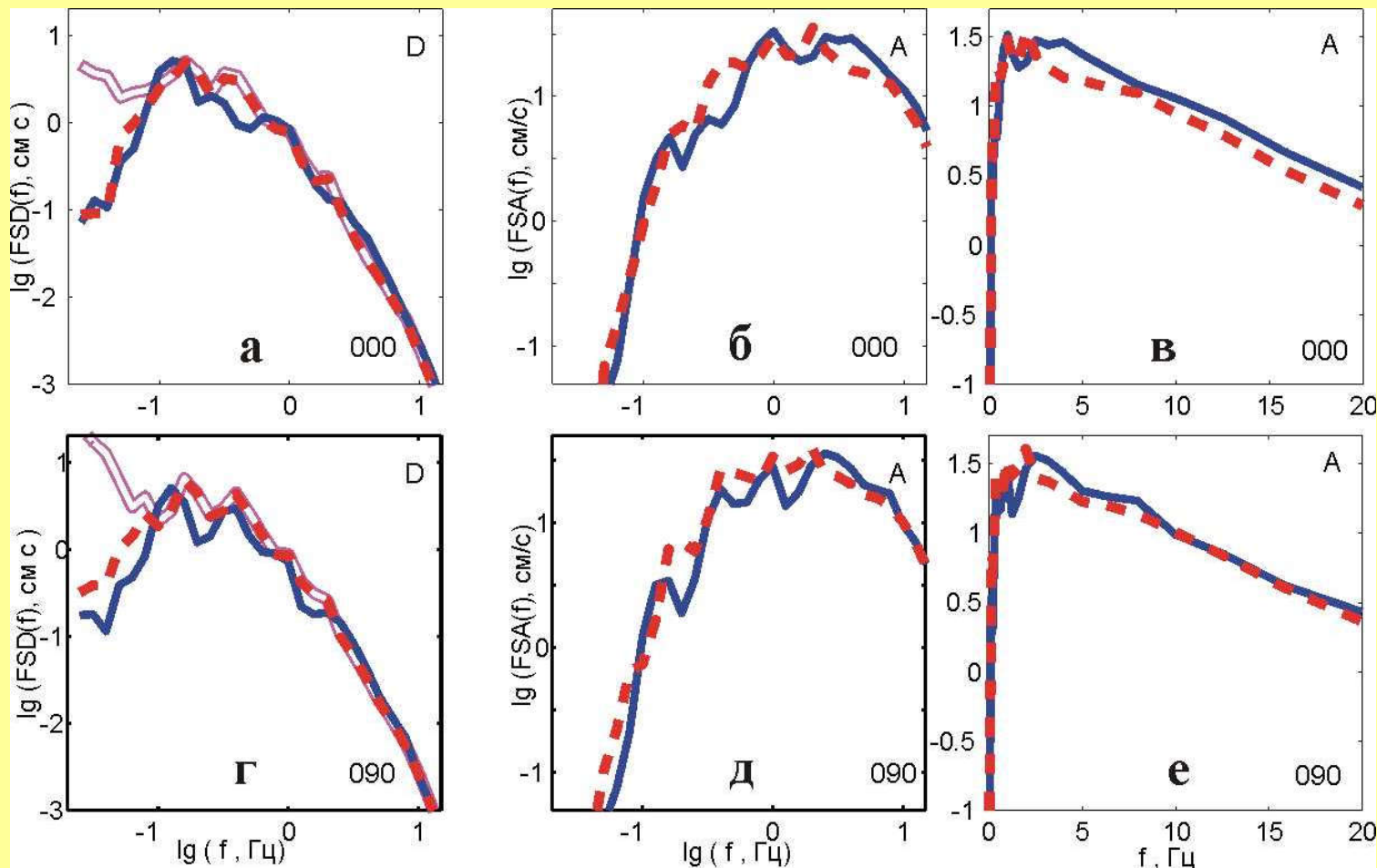
Задача подгонки деталей движения грунта не ставилась и не решалась  
Амплитуды, длительности и общий качественный характер движения  
подогнаны успешно

## Сравнение наблюдаемых и модельных параметров колебаний грунта

| параметр                              | набл. | модель | отношение<br>набл./модель |
|---------------------------------------|-------|--------|---------------------------|
| $a_{\max}(\text{EW}), \text{ см/с}^2$ | 94    | 79     | 0.84                      |
| $a_{\max}(\text{NS}), \text{ см/с}^2$ | 75    | 77     | 1.02                      |
| $v_{\max}(\text{EW}), \text{ см/с}$   | 5.5   | 7.2    | 1.32                      |
| $v_{\max}(\text{NS}), \text{ см/с}$   | 5.8   | 7.3    | 1.24                      |
| $d_{\max}(\text{EW}), \text{ см}$     | 1.89  | 2.12   | 1.12                      |
| $d_{\max}(\text{NS}), \text{ см}$     | 2.41  | 2.31   | 0.96                      |

Примечание. Значения  $d_{\max}$  не имеют строгого смысла, они существенно зависят от выбора частоты среза и даже деталей ВЧ – фильтра, примененного к наблюдаемым и модельным данным.

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



Для описания  
ВЧ спада  
спектра  
ускорения  
подобран  
параметр  
поглощения  
в среде  
«каппа»:  
 $\kappa=0.06\text{c}$

Задача подгонки деталей спектра не ставилась и не решалась

Уровень спектральных амплитуд подогнан успешно от 0.05 Гц до 20 Гц

# Выводы

- Проведено опробование вновь разработанной методики для моделирования сильных движений грунта в широкой полосе частот; в методике используются сейсмологически обоснованные модели излучателя-очага и упругой среды.
- Опробование методики на примере сильного землетрясения 24 ноября 1971 г с очагом вблизи Петропавловска-Камчатского оказалось успешным. Смоделированы близкие к реальности амплитуды, длительности и спектры сильного движения в пункте РЕТ