

А.А.Гусев 2014

Инженерная сейсмология :

Задачи

Методы

Практика на Камчатке

Задачи Инженерной Сейсмологии

В общем: снабдить инженеров адекватной информацией для проектирования сейсмостойких зданий (и сооружений)

Часть 1. Требования инженеров – форма, язык, действующие нормативы

Часть 2. Раздел сейсмологии, обеспечивающий грамотные оценки воздействия для инженеров.для

Часть 1

Требования инженеров: два уровня

Уровень «массовый»: дать расчетную модель воздействия на здание в виде (эквивалентной) инерционной силы (ускорения), что позволяет заменить реальную динамическую(переменную) нагрузку на статическую.

Упрощенный быстрый расчет.

Хорошо формализован с нормативно-юридической стороны.

Хорошо проработанная задача для сейсмолога

Уровень «особый»: дать расчетную модель воздействия на здание в виде ускорения как функции времени (акселерограммы), что позволяет использовать ее при численном расчете на основе модели сооружения.

Расчет сложный даже без учета повреждений, начала разрушения и др.

Менее формализован с нормативно-юридической стороны.

Намного более сложная задача для сейсмолога.

Общие принципы выбора воздействия: оно должно быть **РЕДКИМ**

«Вероятностный подход» (нередко сомнительная точность)

Массовые здания:

повторяемость 1 раз в 500 лет (рядовые); $P=10\%$ за 50 лет
1 раз в 1000 лет (школы больницы и т.п.); $P=5\%$ за 50 лет

Особые здания и сооружения: 1/5000 лет, 1/10000 лет (АЭС)

«Детерминистический подход» (экспертный, вопрос точности не встает))

Особые здания и сооружения:

используем параметры «типичного редкого события» $+ 1 \sigma$

Особый уровень:
язык описания воздействия:

акселерограмма $a(t)$

Массовый уровень:
язык описания воздействия:

Спектр реакции (=ответа)
= *response spectrum*

$$Sa(T)=RA(f)=RSA(f)$$

Всегда: $A=\max(\text{abs}(a(t)))$

- **пиковое ускорение**
- **важнейший практический параметр**
- **движения грунта**

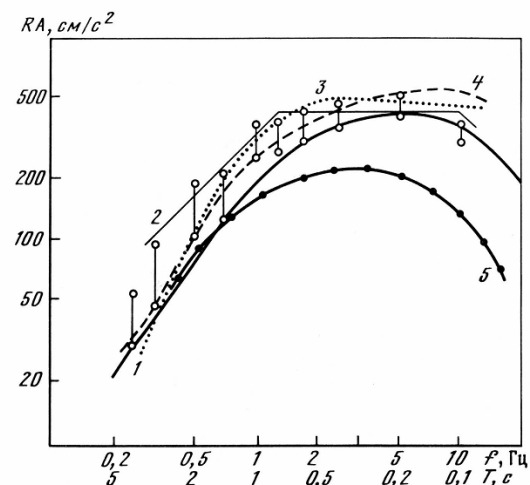
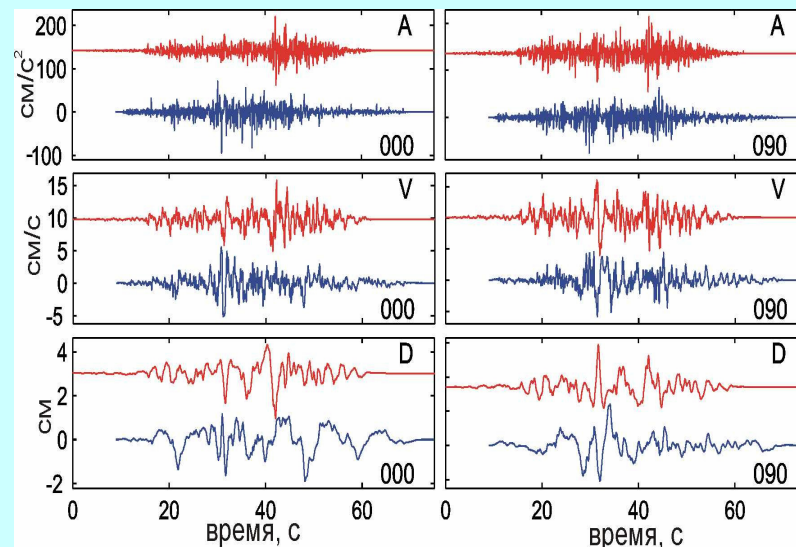
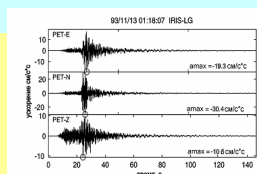
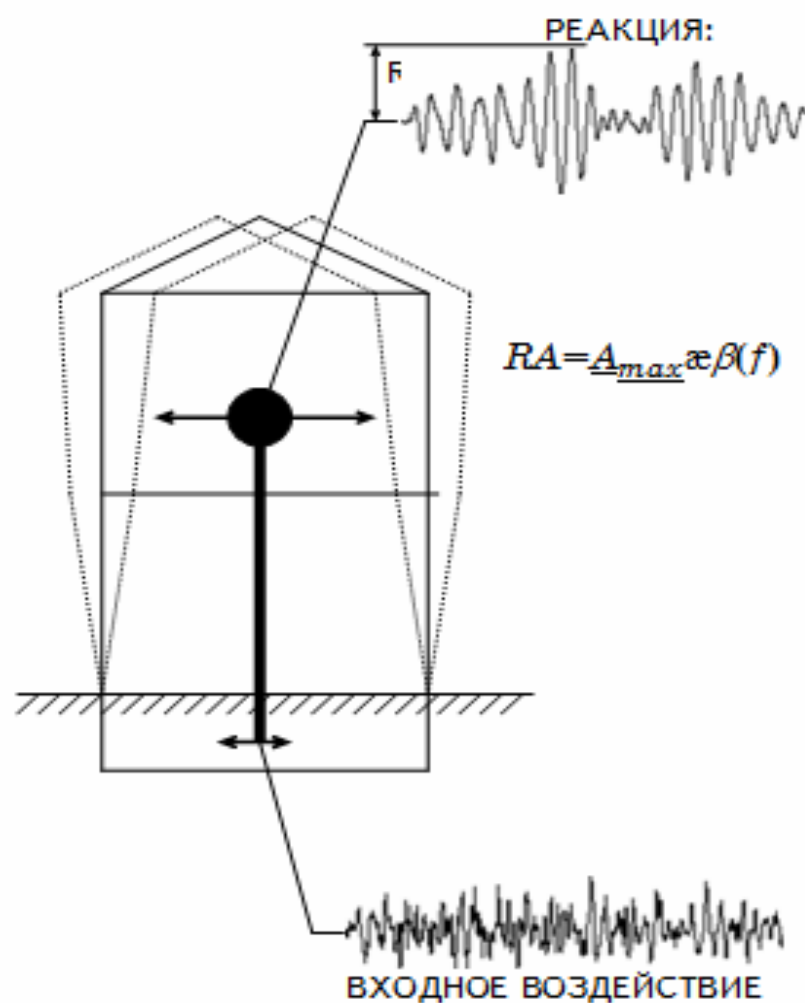


Рис. 5. Сопоставление спектров реакции ускорения для среднего грунта ($M=8$ и $r=85$ км)
1 – см. рис. 4; 2 – мировые данные [16] с нашей экстраполяцией; 3 – модифицированный
спектр сильнейшего толчка из записанных в Петропавловске-Камчатском; 4 – средний из двух
вариантов для Японии; 5 – данные для запада США [19] с нашей экстраполяцией. Парные кружки –
оценки по [26] для $M_W=8$ (нижний кружок) и $M_W=8,4$ (верхний кружок)

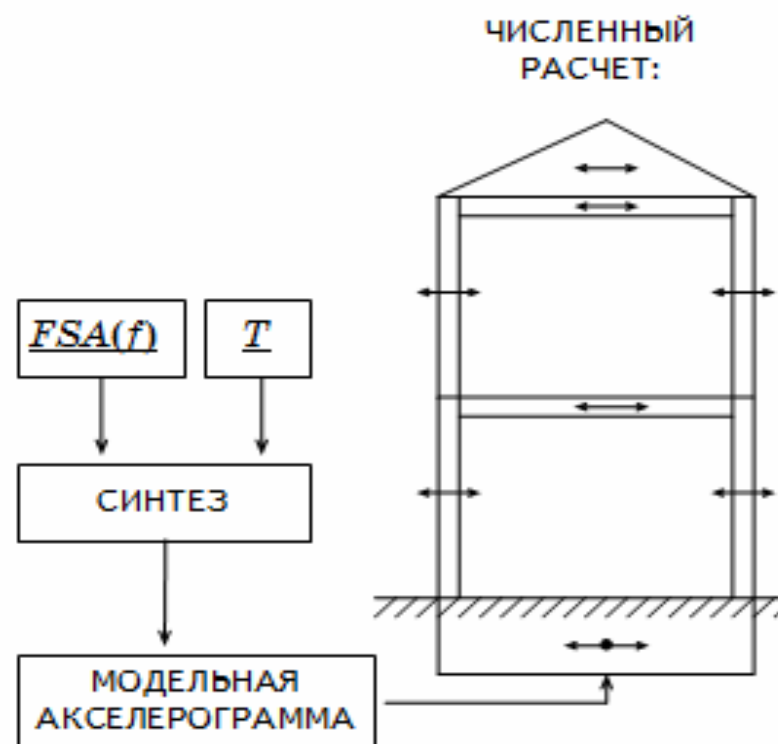


ДВА СПОСОБА РАСЧЕТА ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

ЛИНЕЙНЫЙ (ПРОСТОЙ) РАСЧЕТ



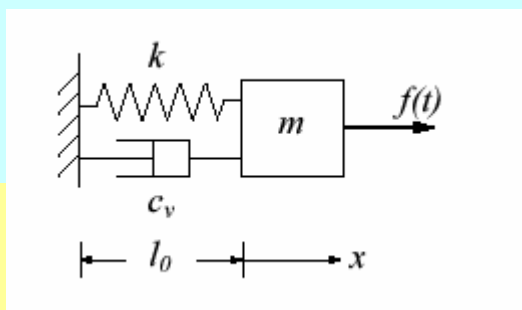
НЕЛИНЕЙНЫЙ, ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ



Спектр реакции [интерфейс сейсмолог-инженер]

Определение спектра реакции

для воздействия $a(t)$

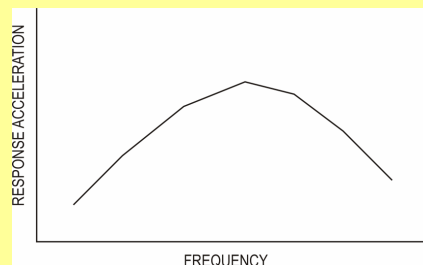


$$RA(f_0, D) = \max(\text{abs}(\ddot{x}(t | f_0, D)))$$

где $x(t)$ – перемещение центра тяжести
это решение уравнения

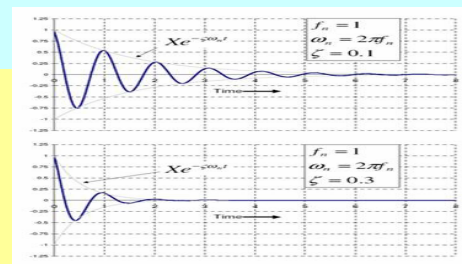
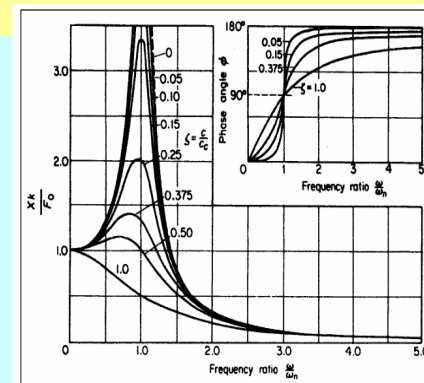
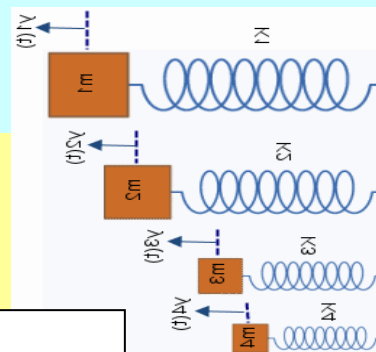
$$\ddot{x} + 2D\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = a(t)$$

$$\omega_0^2 = k / m \quad f_0 = \omega_0 / 2\pi$$



D - безразмерное затухание

Для основной массы сооружений
можно принимать, что $D=0.05$
(5%)



Внимание: частота $f_0 = 1/T$ в
аргументе спектра
реакции – собственный
период осциллятора
логически не связана с
частотой f - аргументом
ПФ $a(f)$ от воздействия
 $a(t)$

Российско-советская система задания нормативных нагрузок (СНиП, СП)

Расчетный спектр реакции записывается как

$$RA(T) = A \cdot \beta(T)$$

где:

$\beta(T)$ – нормированный безразмерный спектр реакции,
зависит (слабо) от грунтовых условий

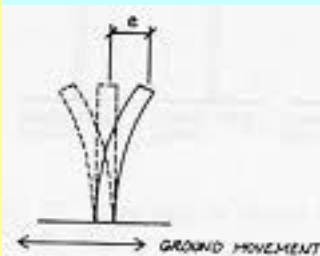
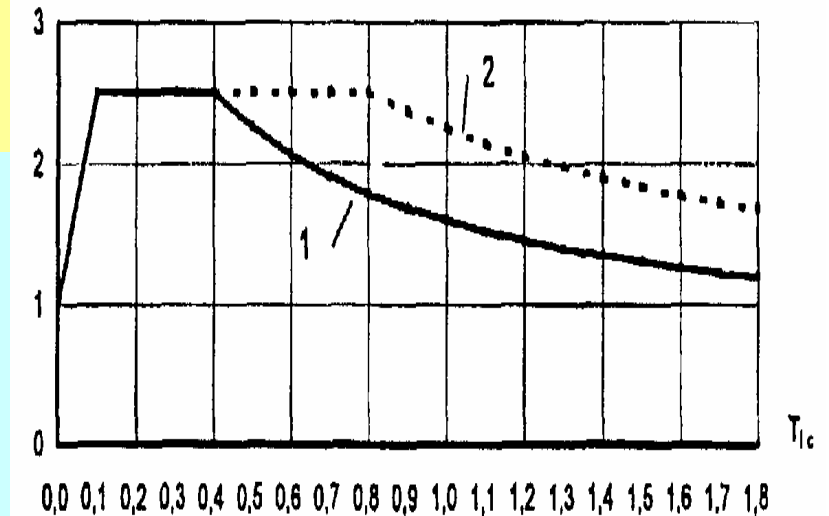
A – расчетное пиковое («максимальное») ускорение в единицах **g**, жестко связано с расчетной макросейсмической интенсивностью («сейсмичностью») I :

$$A = 0.1 \cdot 2^{I-7}$$

а «сейсмичность» I нормируется для каждого пункта страны по следующей схеме

$$I = I_{\text{ОСР}} + \Delta I_a$$

для здания массы m с собственным периодом T :
сейсмическая сила : $F = m \cdot RA(T)$



Российско-советская система задания нормативных нагрузок (СНиП, СП) [продолжение]

«сейсмичность» I (целое в баллах) нормируется для каждого пункта страны и для каждого типа («категории») грунта и для каждого уровня ответственности здания по следующей схеме

$$I = I_{\text{ОСР,АВС}} + \Delta I$$

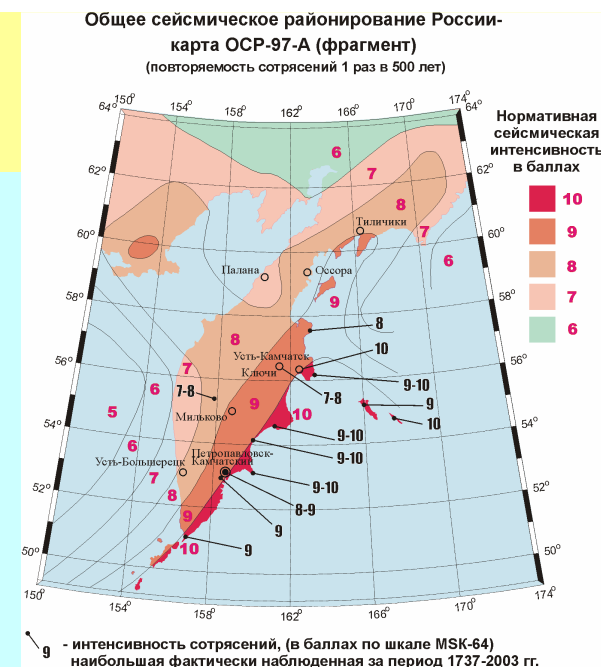
где: $I_{\text{ОСР,АВС}}$ - «сейсмичность для среднего грунта», снимается с одной из карт общего сейсмического районирования (ОСР) страны «А» «В» «С», целое из диапазона [6, 7, 8, 9, «более 9»]

ΔI – «приращение балльности за грунтовые условия», определяется на основе инженерно-геологических изысканий под названием сейсмическое микрорайонирование (СМР), целое из диапазона [-1, 0, 1]

$\Delta I = -1$ – скальный грунт – кат. 1

$\Delta I = 0$ – средний грунт – кат. 2

$\Delta I = +1$ – мягкий грунт – кат. 3



**Российско-советская система
задания нормативных нагрузок**

(СНиП, СП)

Нормативная интенсивность для ср.грунта «сейсмичность»

Карты ОСР создаются методом вероятностного анализа
сейсмической опасности (BACO, PSHA) на основе двух типов данных:

- (1) информации о сейсмичности, то есть о распределении очагов землетрясений разных магнитуд в пространстве (эпицентр, глубина), и о частоте (повторяемости) очагов каждого уровня магнитуды. Частота событий принимается постоянной! _
- (2) информации о воздействиях (I , A , RA) на среднем грунте для каждой комбинации магнитуда M - расстояние очаг-площадка r

$$I=I(M, r) \text{ [в России, Казахстане]}$$

$$A=A(M, r) \text{ [в большинстве стран]}$$

$$RA(T)=RA(M, r/T) \text{ [в США, для двух периодов } T=1 \text{ с и } 0.2 \text{ с]}$$

Для каждой точки карты в расчете карты ОСР суммируются вклады всех очагов
вокруг этой точки с учетом их повторяемости
так для этой точки строится функция опасности (сотрясаемость)_

$B(I)$ [штук/год] – частота событий $I^*>I$ _

Нормативный балл на карте « A » – обратная функция $I=B^{-1}(T=500\text{лет})$

**Российско-советская система
задания нормативных нагрузок**

(СНиП, СП)

«приращение балльности ΔI »

Экспериментально установлено, что на площадках с разными грунтовыми условиями амплитуды колебаний при тех же M и r - разные.

Причина – в законе сохранения энергии.

Плотность потока энергии синусоидальной поперечной (S) волны

$$E = \rho c_S V^2$$

где ρ – плотность (г/см³)

c_S – скорость распространения S -волны

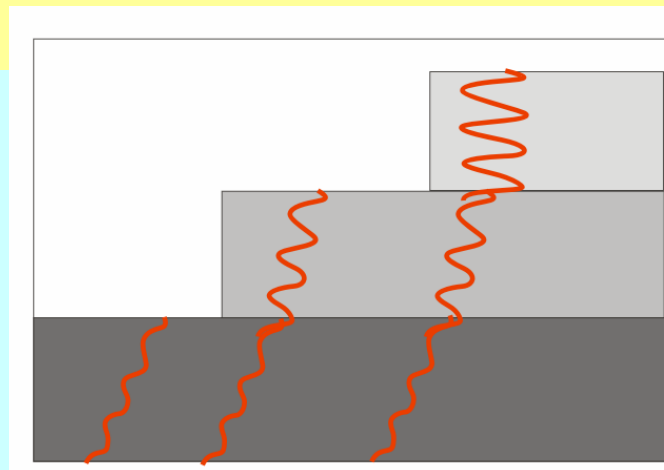
V – амплитуда скорости частицы в волне

ρc_S – «акустическая жесткость», = импеданс

При фиксированной E ,

с уменьшением c_S и ρ ,

амплитуда растет как $(\rho c_S)^{0.5}$



гранит	1300 м/с	кат.1
известняк	700	кат.1
мергель	500	кат.2
галечник	600	кат.2
супесь, илы	150	кат.3
ВулОсОт	400	кат 2

**Российско-советская система
задания нормативных нагрузок
(СНиП, СП)**

«приращение балльности ΔI » -2

Кроме влияния импеданса, при СМР важны следующие факторы:

1. Толщина слоя с определенным импедансом (эффект импеданса зависит от частоты)
2. Наличие слоев с резкими границами и резонансы в таких слоях (+)
3. Неупругое затухание (потери) в верхних слоях (-)
4. Эффекты рельефа (гора:+, каньон: -) (и подземного рельефа)
5. Эффект грунтовых вод
6. Осадочные бассейны для SH (+) (фокусировка)
7. Осадочные бассейны для поверхностных волн (+)

В практике СМР плохо учитывается

*Важнейший осложняющий фактор при больших амплитудах –
разрушение грунта*

*Вся схема СМР в этом случае нарушается,
возникают нелинейные эффекты.*

*Нередко грунт течет
(разжижается)*

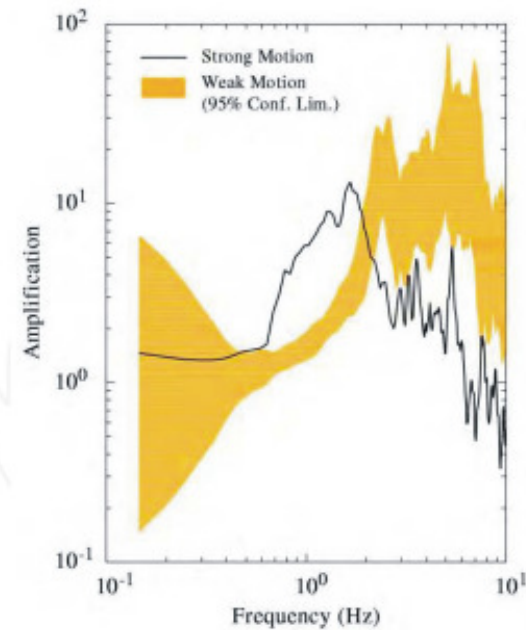


Fig. 4.2. Borehole transfer functions computed at KiK-net station TTRH02 in Japan. The orange shaded area represents the 95% confident limits of the transfer function using weak-motion events ($\text{PGA} < 10\text{cm/s}^2$). The solid line is the transfer function computed using the October 2000 Tottori mainshock data.

Часть 2 - сейсмологическая

Зачем это нужно?

Если имеется хорошая статистика – например в случаях учета ветра или температуры воздуха – тогда применим простой эмпирический подход.

Но сильнейшие землетрясения редки, статистики просто нет. К тому же инженерам бывают нужны параметры **очень редких** землетрясений. В таком случае нельзя предсказать параметры движения грунта или дать правдоподобную модель такого движения без изучения слабых и умеренной силы землетрясений и дальнейшей экстраполяции на «типичные сильнейшие» и «аномально мощные сильнейшие» землетрясения.

Такой прогноз возможен двумя путями:

- (1) на основе эмпирических закономерностей
- (2) на основе теоретических моделей.

Нередко приходится использовать гибридный – полуэмпирический – подход.

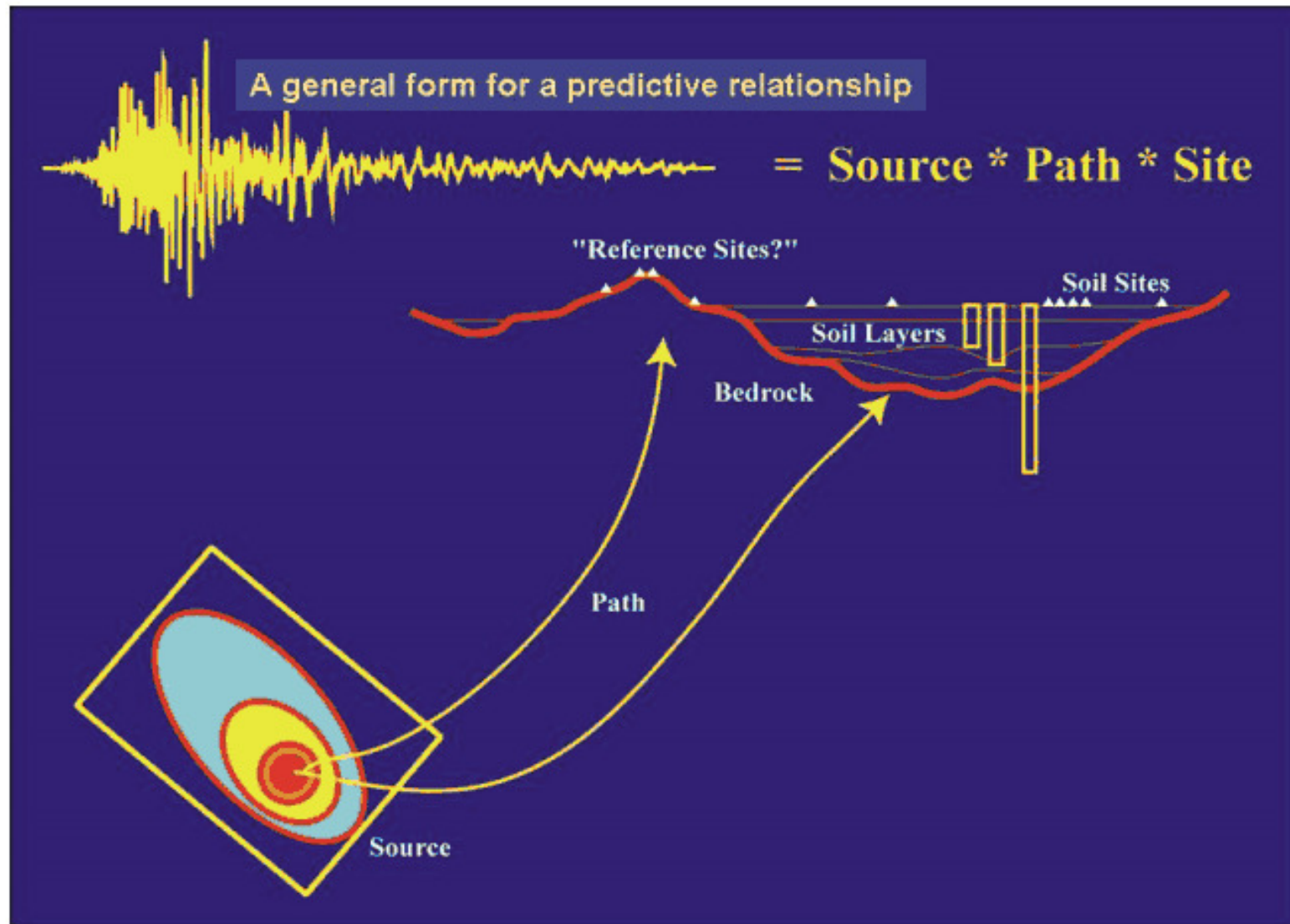


Схема формирования движения грунта

$$A(t) = E(t) * L(t) * G(t)$$

$$A(f) = E(f) \cdot L(f) \cdot G(f)$$

$A(t)$ временная функция
очага по ускорению

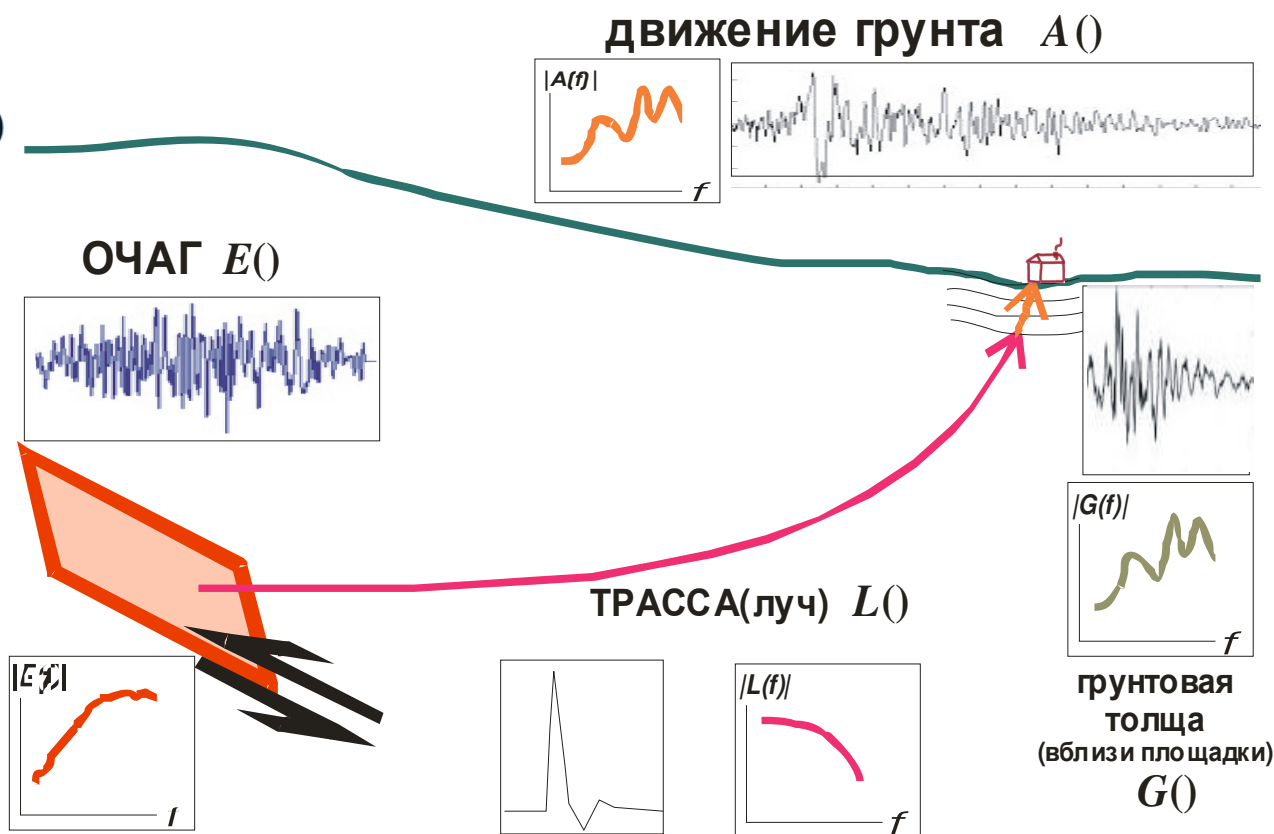
$A(f)$ ее преобразование Фурье
(комплексный спектр)

$L(t)$ импульсная реакция
трассы (луча)

$L(f)$ ее преобр. Фурье
(передаточная функция)

$G(t)$ импульсная реакция
грунтовой толщи

$G(f)$ ее преобр. Фурье
(передаточная функция)



Параметры движения грунта

Макросейсмическая интенсивность (балл) I

Пиковые значения: ускорения A , скорости V , смещения D

Значения (уровни) спектров реакции RA для набора частот $f_1, f_2, f_3...$

Значения продолжительности колебаний d (зависят от f)

Значения (уровни) спектров Фурье FSA для набора частот $f_1, f_2, f_3....$

Основные факторы, влияющие на параметры движения грунта

Магнитуда M (обычно M_s, M_w)

Гипоцентральное расстояние r (плохо определено вблизи протяженного очага)

Эпицентральное расстояние D

Тип грунта (плохо определен)

Глубина очага

Направление движения (горизонтальное, вертикальное)

Примеры на камчатском материале

Связь балл – магнитуда – расстояние [УПДГ]

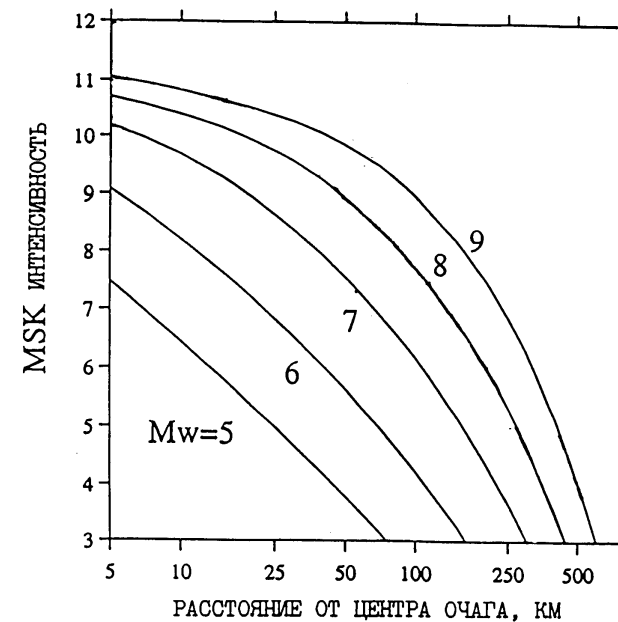
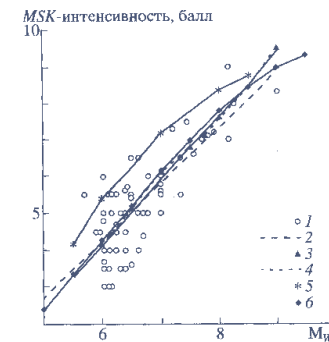
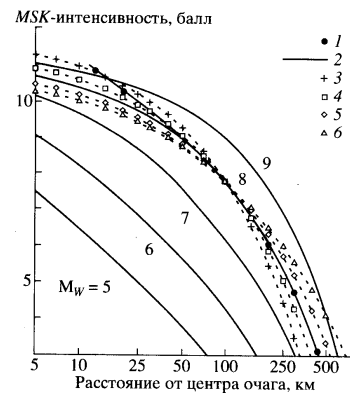
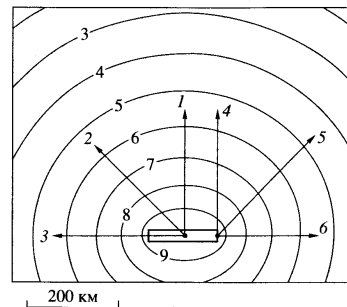
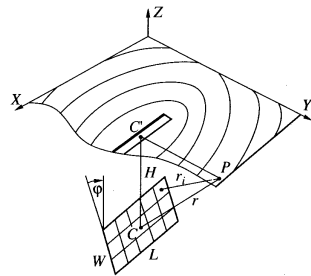
Простой подход (Шебалин после многих)

$$I = bM + v \lg r - s$$

r - гипоцентральное расстояние

При малых r , I насыщается: $I < I_0$; $I_0 = I_0(M)$

Подход ГШ1999 - полуэмпирический



Связь пиковое ускорение – магнитуда – расстояние [УПДГ]

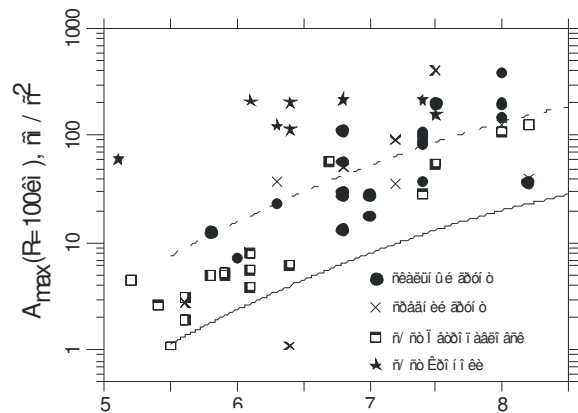
$$\lg A = bM + v \lg r + cg - s$$

r - гипоцентральное расстояние

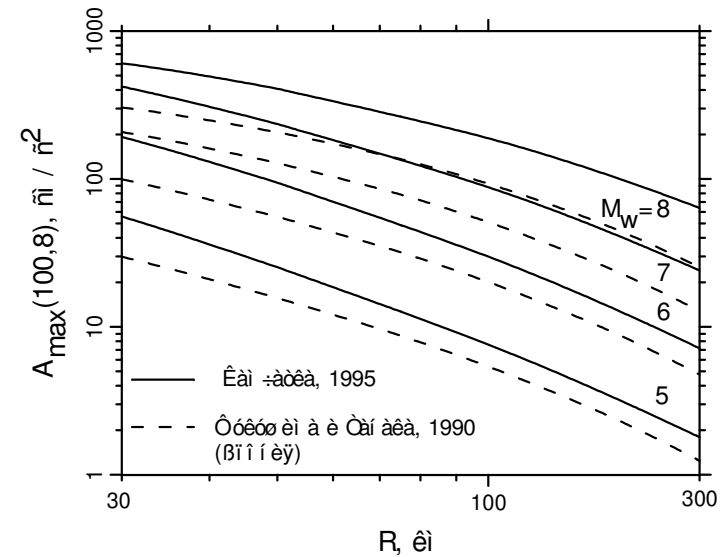
cg – добавка за грунт

При малых r , A насыщается

Подход 1997 - полуэмпирический



Примечание: с 100 км наблюдается горизонтальное ускорение, зависимость от магнитуды (абсолютная) почти отсутствует, что объясняется тем, что для малых r величина A_{max} зависит от грунта. Среднее значение A_{max} (при $r=100$ км) получено при использовании этих данных.



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

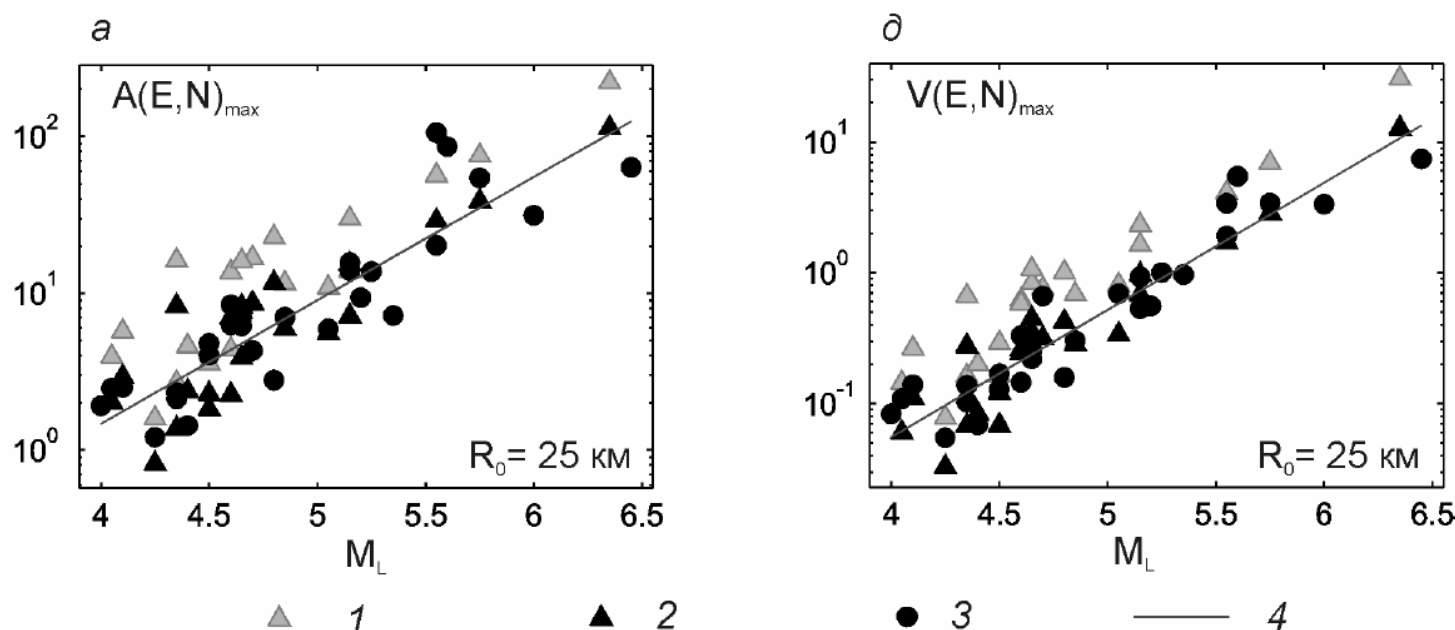


Рис 6.1. Зависимость максимальных амплитуд ускорения (слева, в cm/s^2) и скорости (справа, в cm/s) горизонтальных колебаний грунта от магнитуды. Используется локальная магнитуда $M_L = 0.5 K_S - 0.75$, где K_S - энергетический класс по С.А. Федотову. Амплитуды приведены к единому фиксированному гипоцентральному 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.

Связь спектр Фурье – магнитуда – расстояние [УПДГ]

Подход 1999 - полуэмпирический

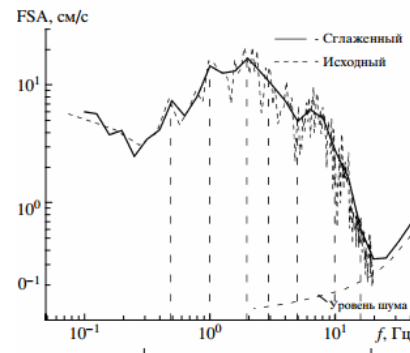
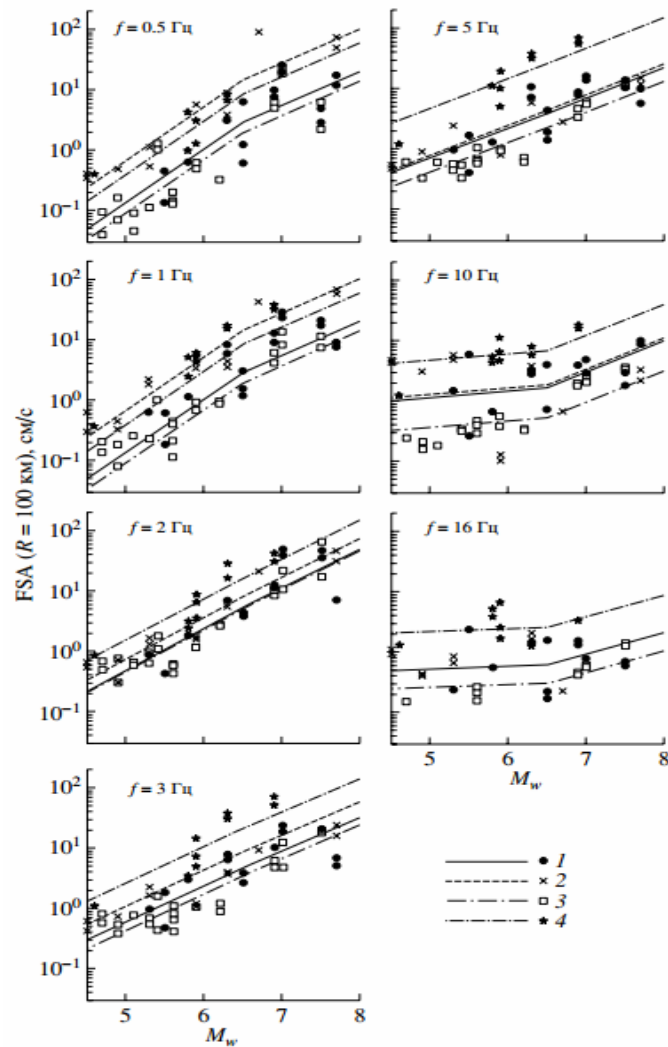
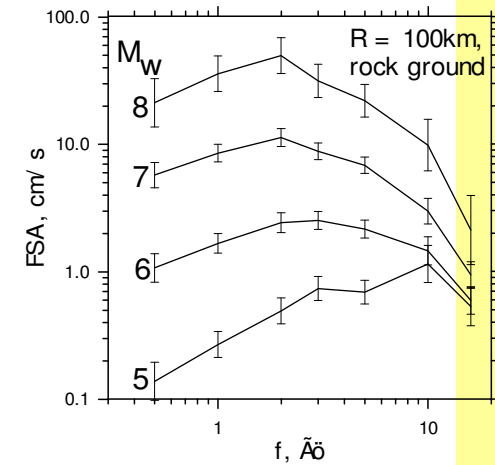
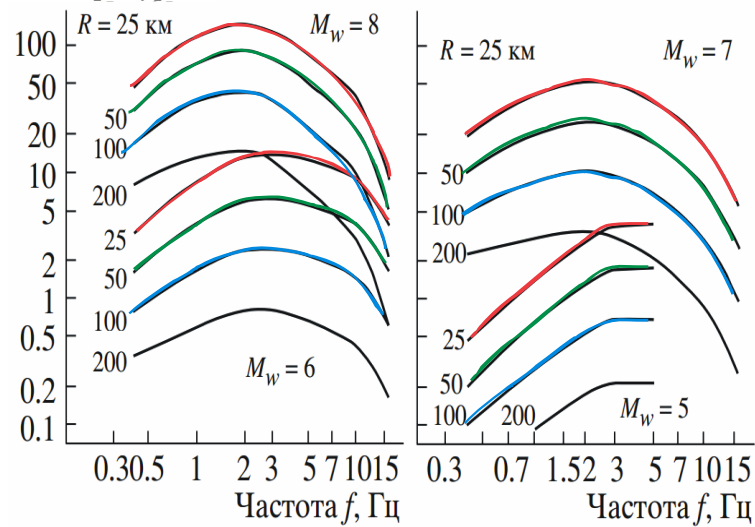


Рис. 3. Пример расчета спектра Фурье. Землетрясение 2 марта 1992 г., записанное на ст. Жупаново (GPN). Чертой снизу обозначен диапазон частот, в котором надежно определяется спектр Фурье.

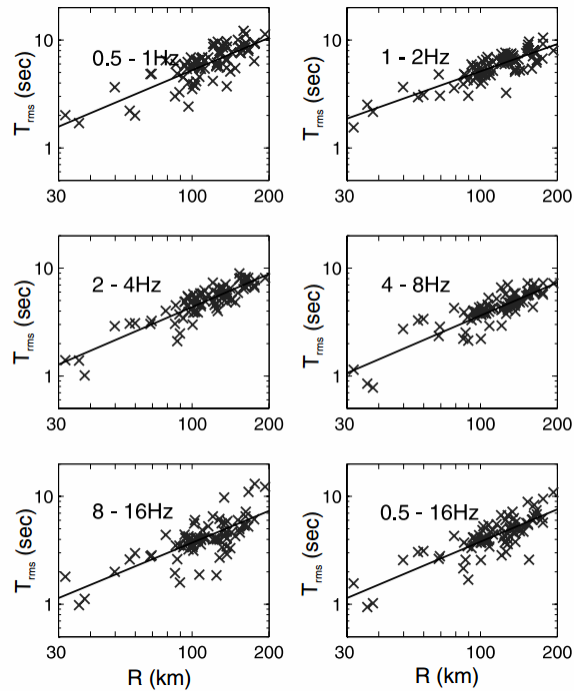


Спектр Фурье FSA, см/с



Связь длительность – расстояние

для малых M



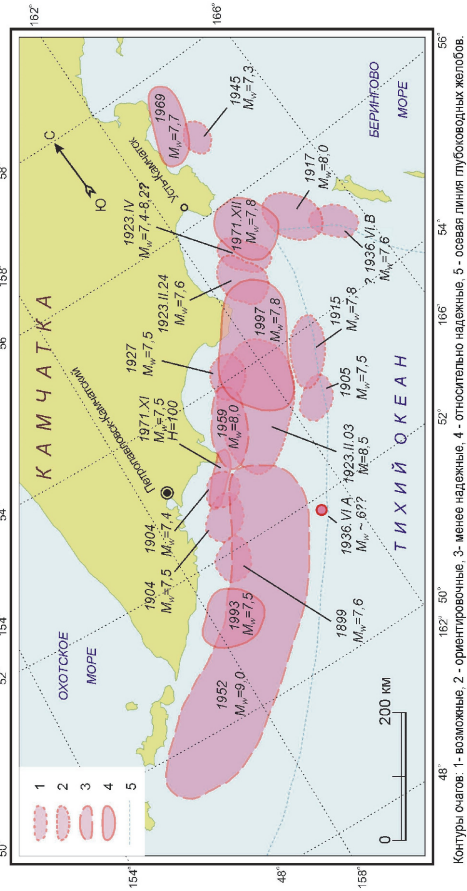
для больших M

$$\lg T = 0.5 Mw - 2.3$$

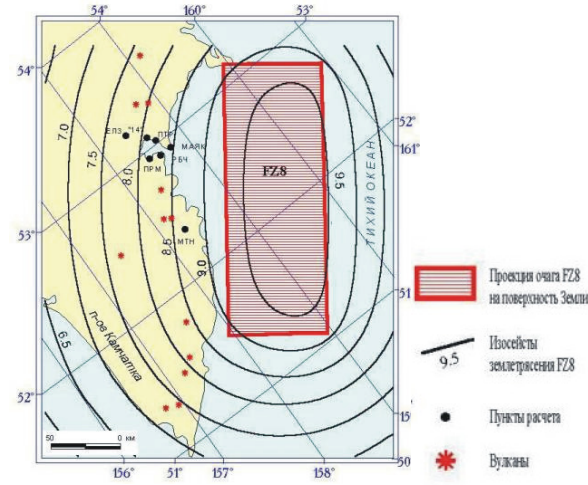
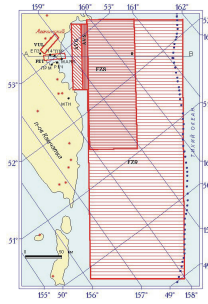
В целом, в силу свертки $d = (T(\text{очаг})^2 + d(\text{трасса})^2)^{0.5}$

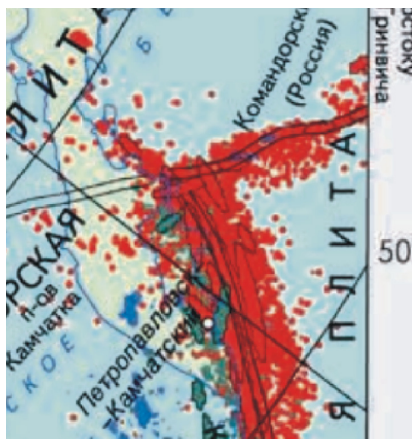
Расчет модельного поля интенсивности (изосейст) для сценарных землетрясений

Схема расположения очагов сильнейших землетрясений Камчатки с 1899 г.



На схеме отражен истории сильных результатов пересмотра землетрясений





BACO

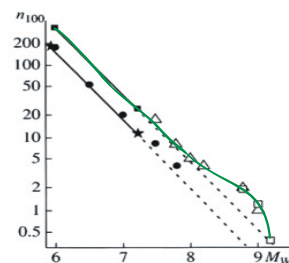
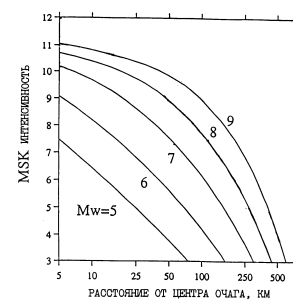
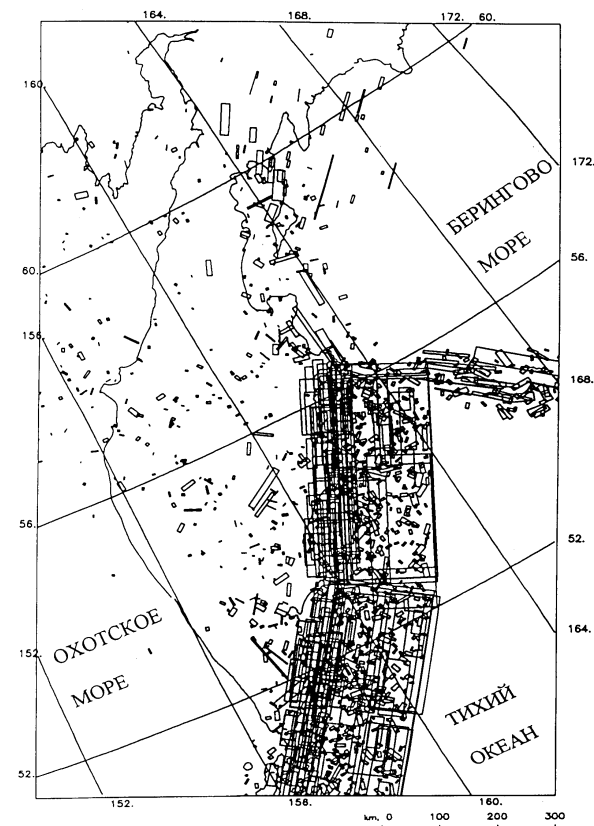
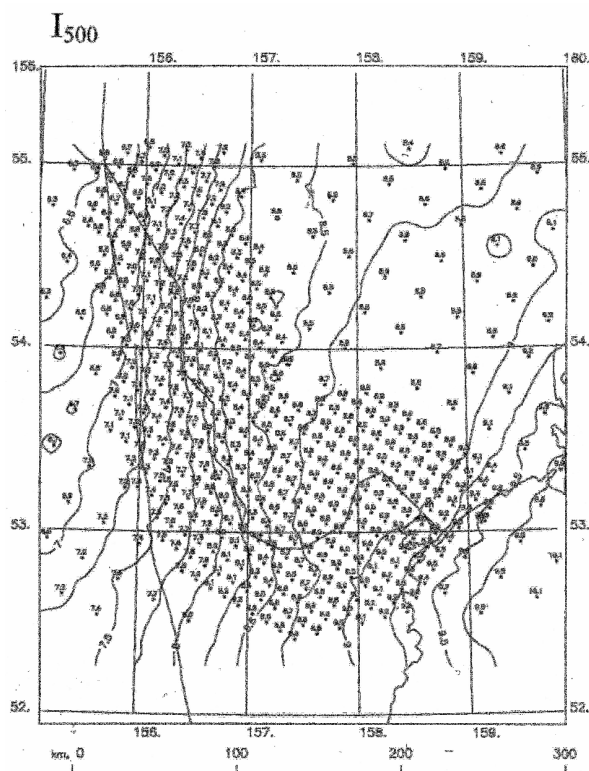
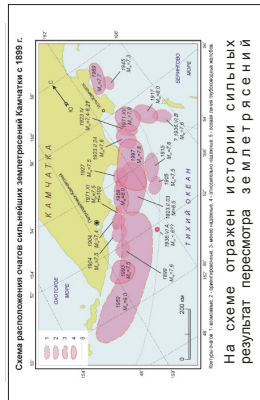


Рис. 2. Сводка кумулятивных графиков повторяемости землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд. Все графики приведены к единому периоду 100 лет. Черные квадраты и соединяющая прямая – оценка по данным 1923–4 ноября 1952 гг. (см. табл. 4), продолжение этой прямой в виде штриховой линии – экстраполяция этих данных на большие магнитуды. Звездочки – аналогичное построение по данным 1962–2000 гг. (см. табл. 4). Залитые кружки – данные



BACO 2



На схеме отражен истории сильных
результат пересмотра землетрясений

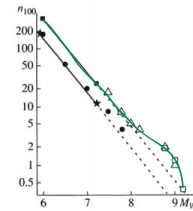
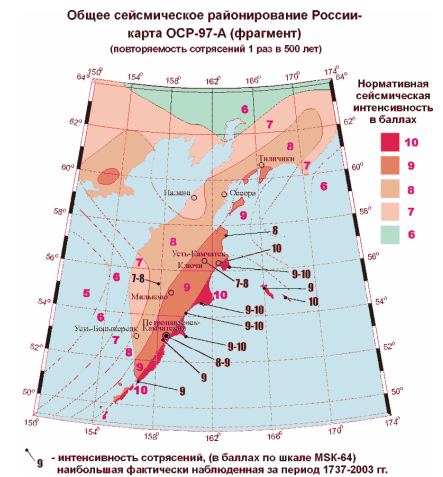
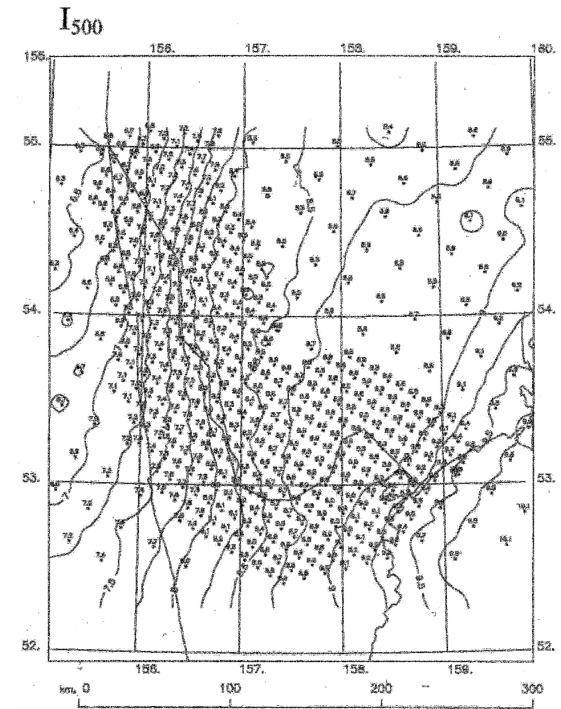
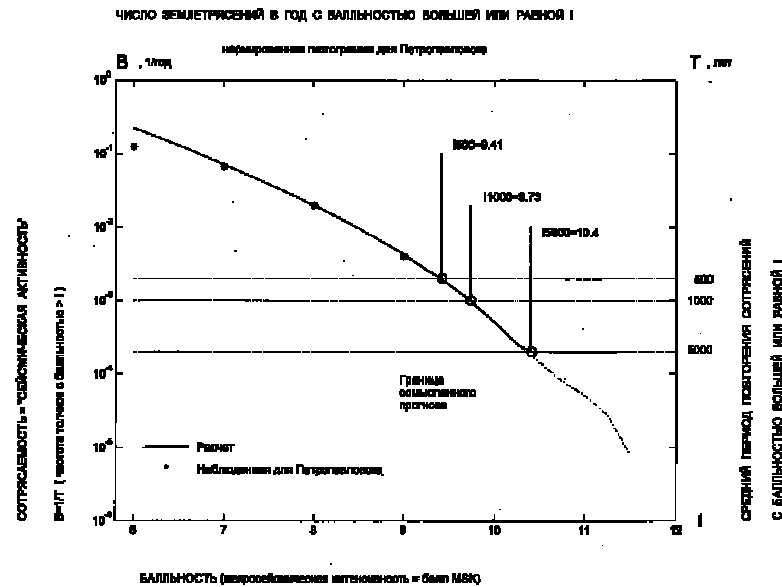
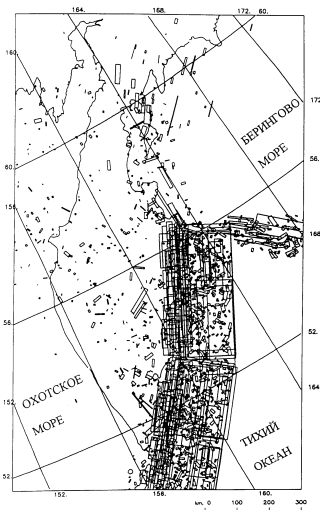
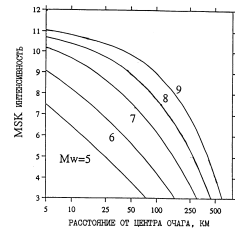
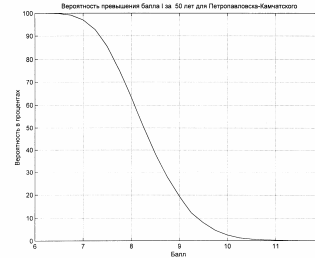
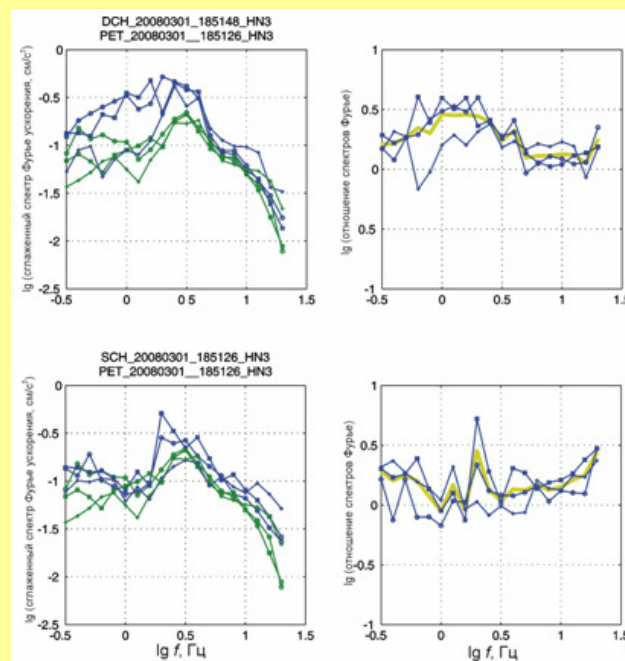
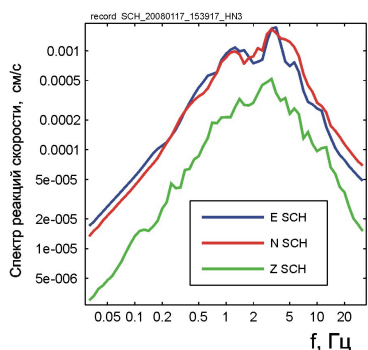
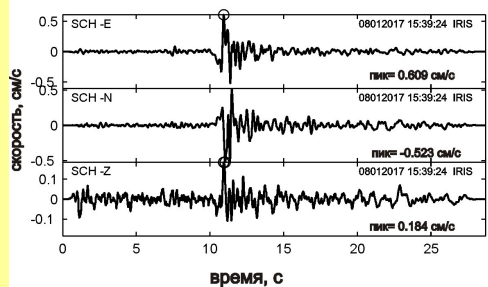
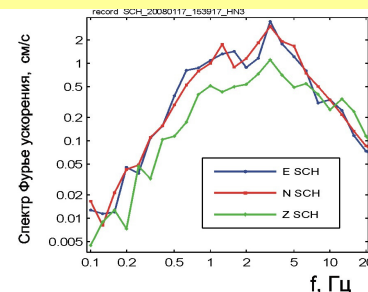
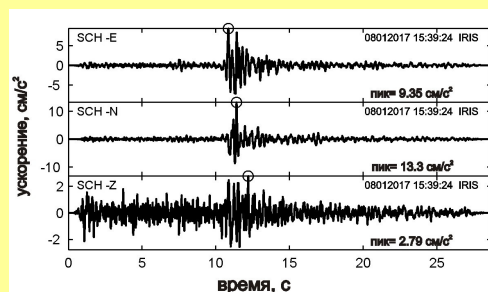


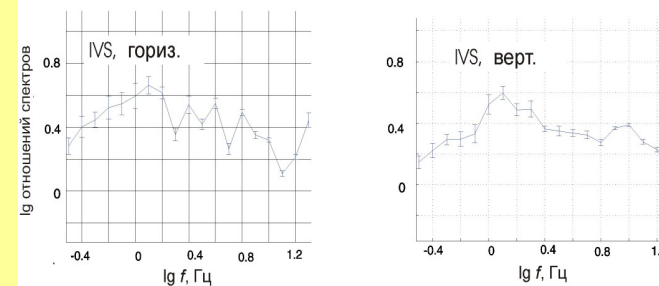
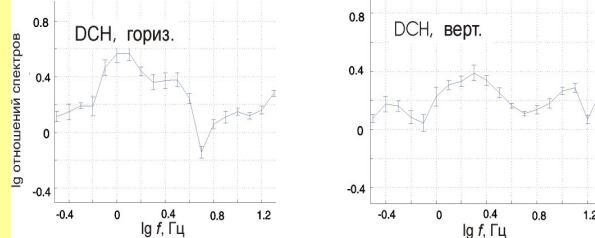
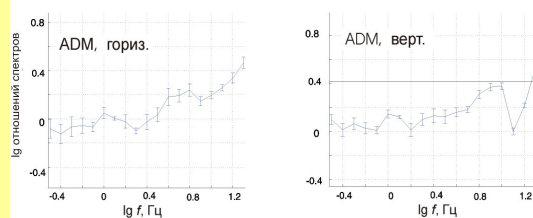
Рис. 2. Сводка кумулятивных графиков повторяемости землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд. Все графики приведены к единому периоду 100 лет. Черные квадраты и соединяющая прямая – оценка по данным 1923–4 ноября 1952 гг. (см. табл. 4), продолжение этой прямой в виде штриховой линии – экстраполяция этих данных на большие магнитуды. Заштрихован – аналогичное построение по данным 1962–2000 гг. (см. табл. 4). Залитые кружки – данные



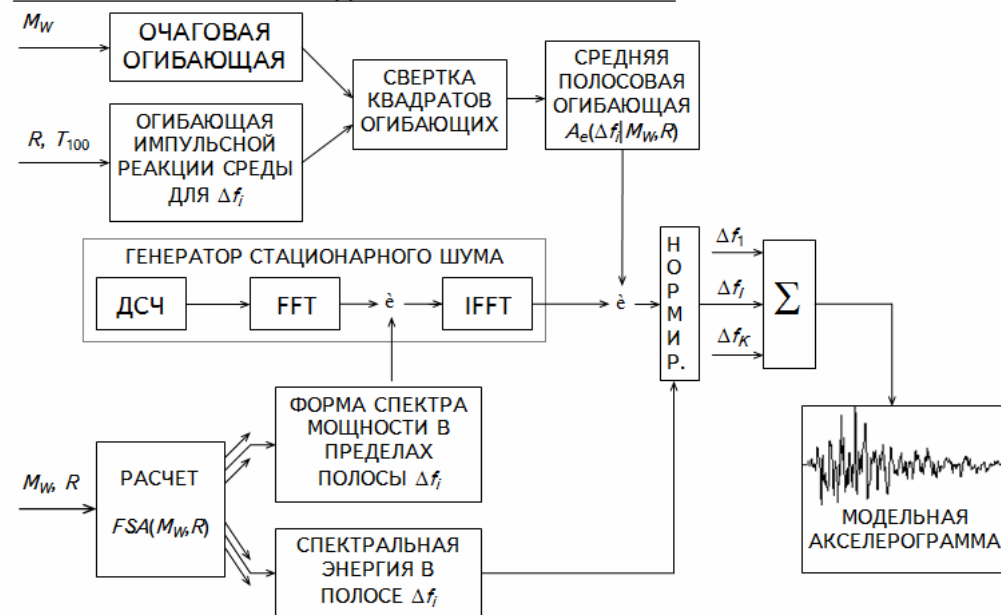
Инструментальное СМР



а



БЛОК-СХЕМА РАСЧЕТА МОДЕЛЬНЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ.



Пример упрощенного моделирования акселерограммы (с контролем по реальному материалу)

A. G. Petukhin and A. A. Gusev

Pure appl. geophys.,

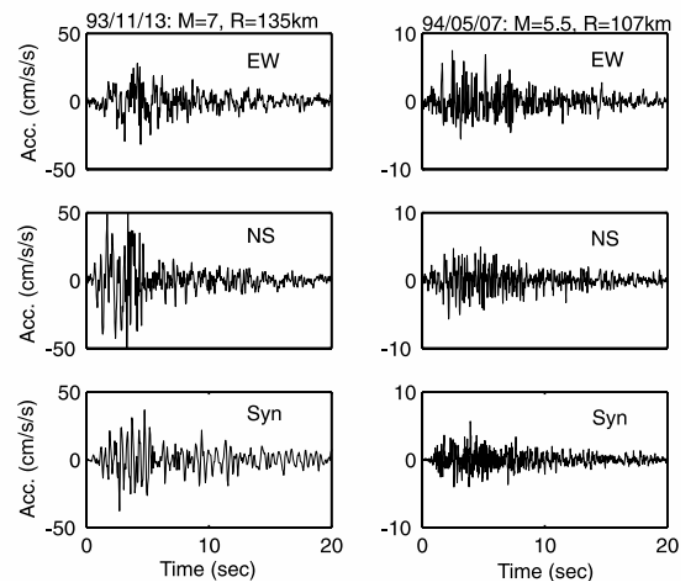


Figure 11

Examples of the synthetic accelerograms (Syn) compared to the observed records (EW and NS components). Left column of subplots shows observed records and synthetic result for magnitude $M = 7$ earthquake on November 13, 1993, $R = 135$ km; right column is the same for $M5.5$ earthquake on May 7, 1994, $R = 107$ km. Only S -wave parts of records were synthesized here.

Более детальная процедура моделирования
и проверка ее корректности путем сравнения с
наблюдаемыми движениями грунта

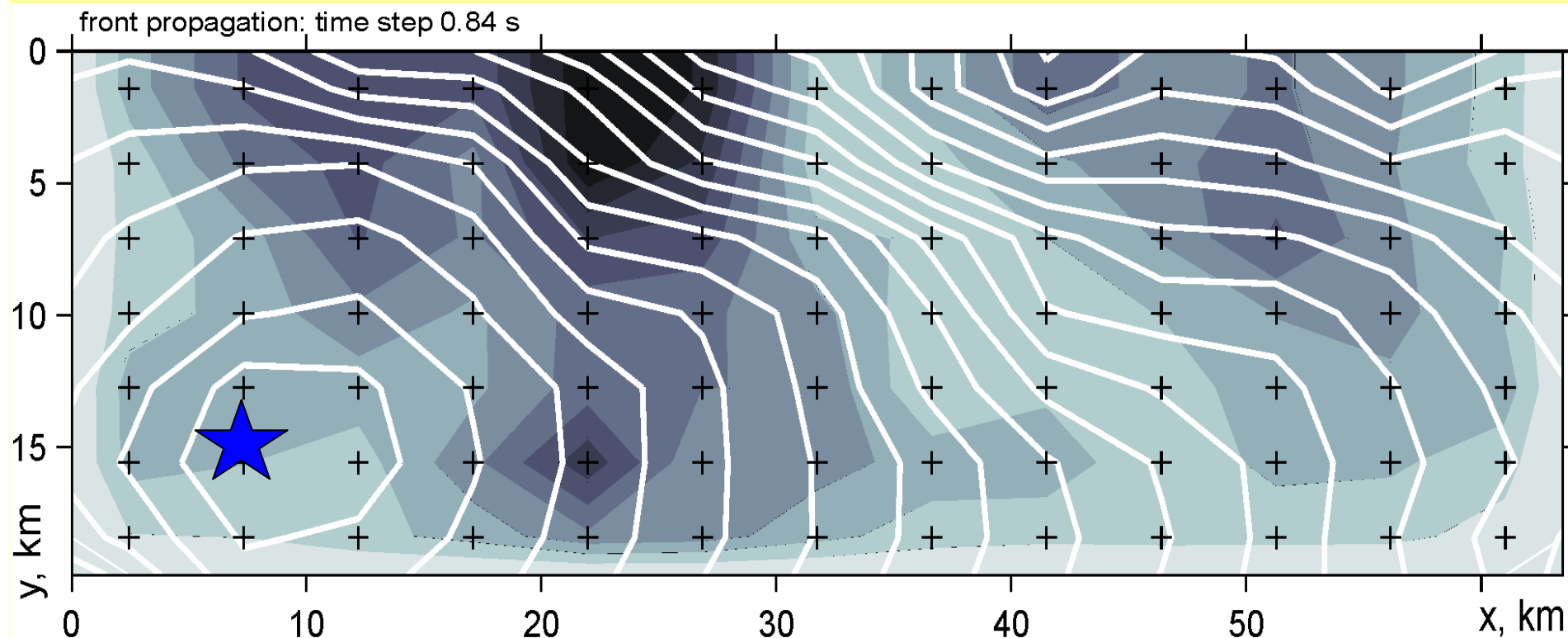
Пример моделирования финальной подвижки

Градации серого: амплитуда подвижки = мощность субисточника

Белые контуры: последовательные положения фронта разрыва

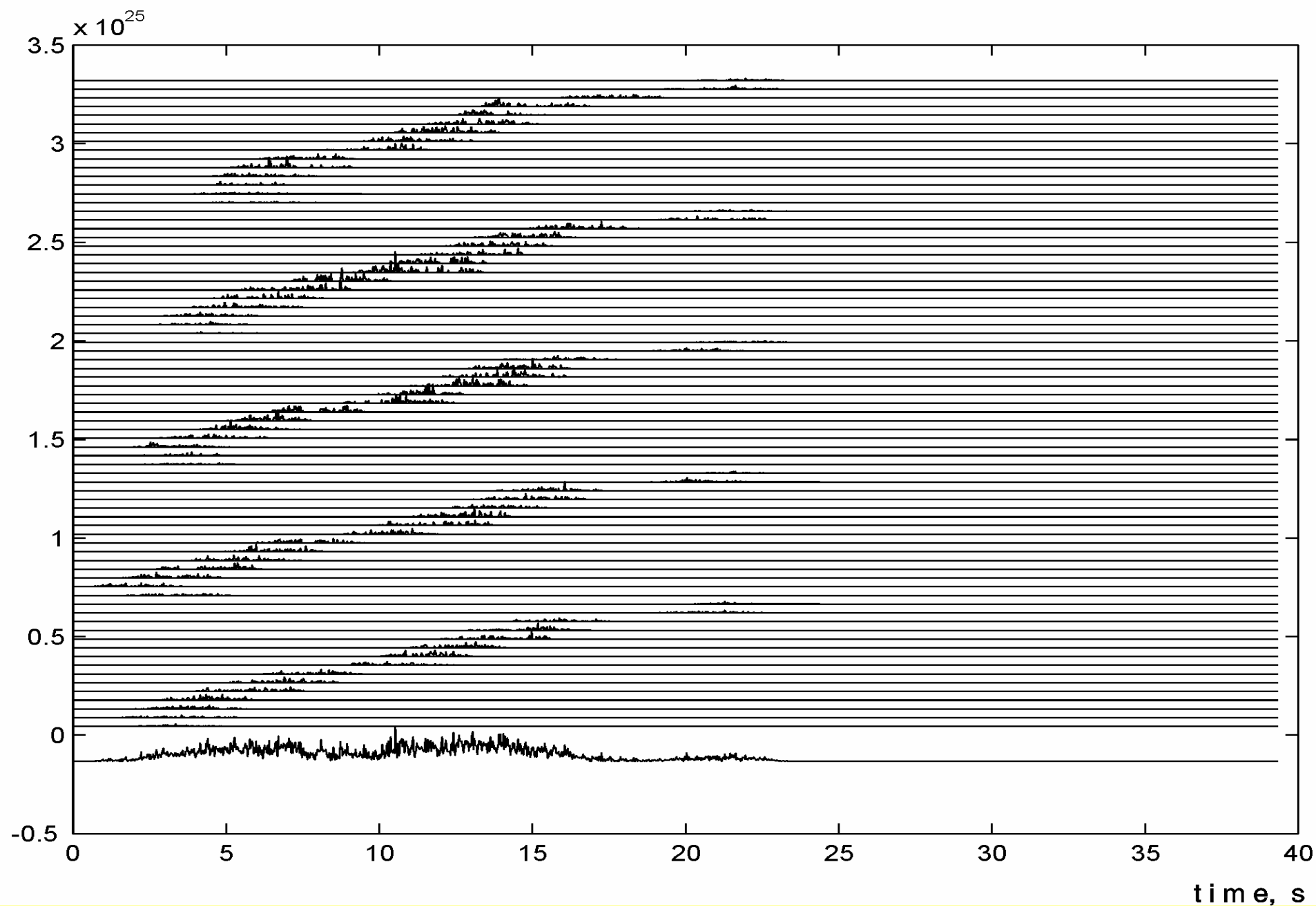
★ гипоцентр

+ субисточник



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

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

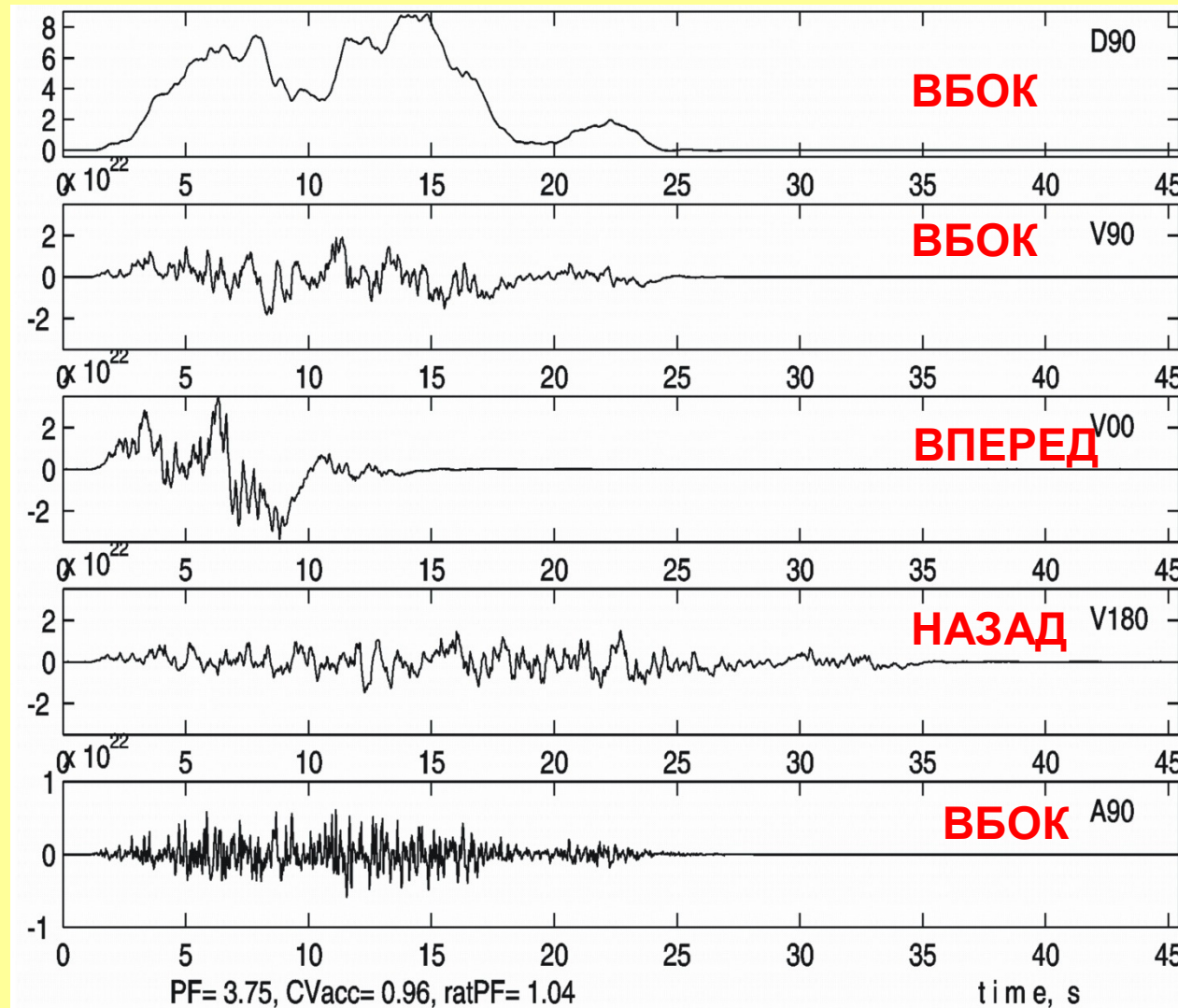
D, Az=90°
(ББОК)

V, Az=90°
(ББОК)

V, Az=0°
(ВПЕРЕД)

V, Az=180°
(НАЗАД)

A, Az=90°
(ББОК)

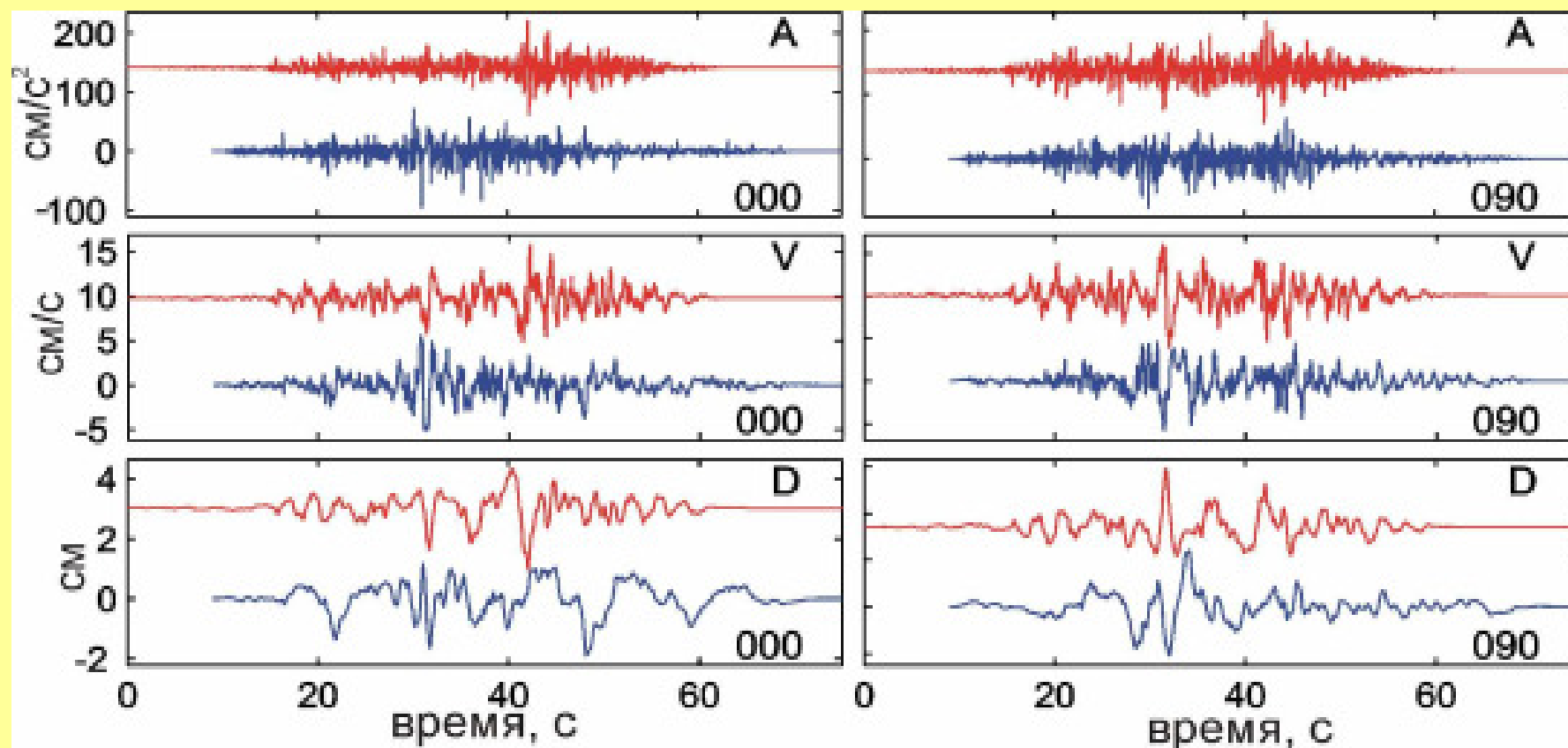


D90, V90 and A90:
For an observer on the normal to the fault

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

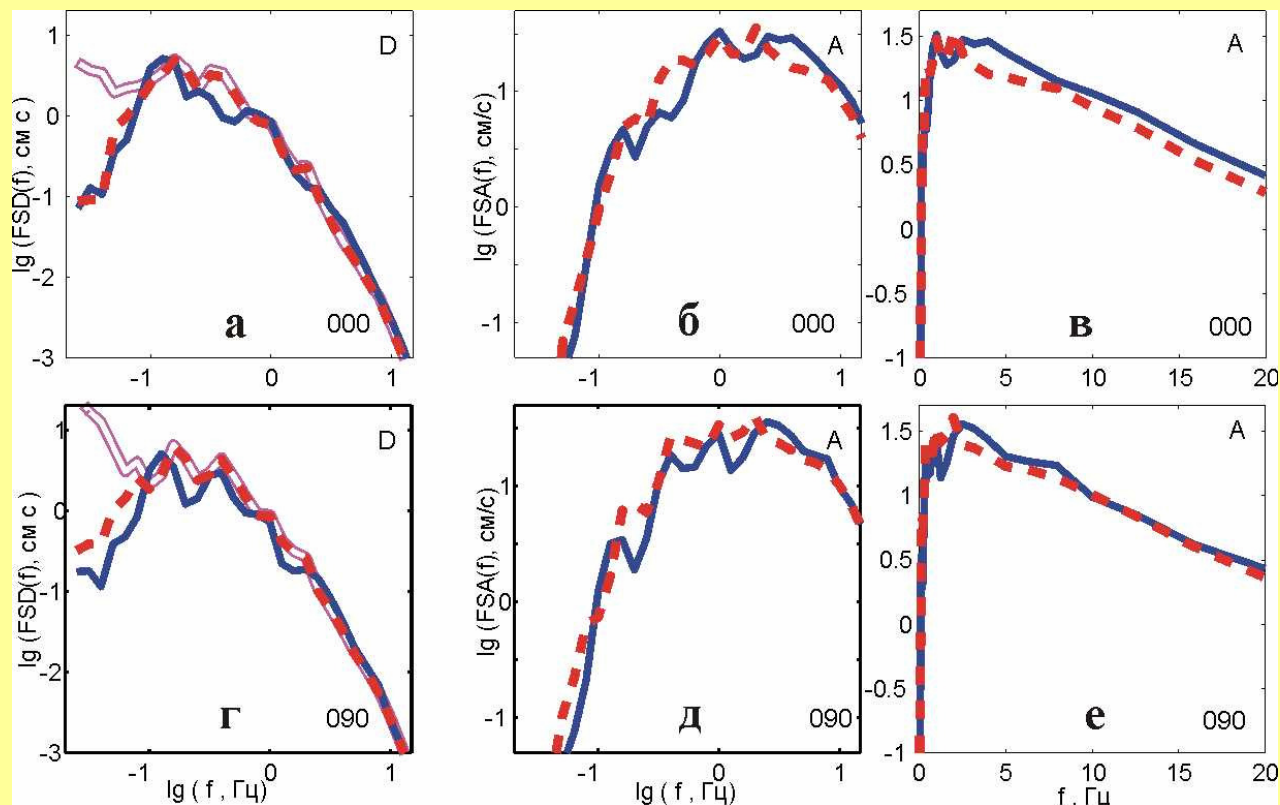
1971.11.24 М7.7 Н120 ст Петропавловск

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