

А.А.Гусев

Сейсмология:
Поле деятельности
Точки роста

2016

Сейсмология:

наука о землетрясениях

и об упругих волнах в Земле:

от землетрясений

и от иных источников

Фундаментальная сейсмология:

(1) Сейсмические волны и зондирование земных недр

- 1.1. Сейсмические волны как явление. Скорость, затухание, анизотропия, дисперсия, рассеяние. Поверхностные волны и собственные колебания планеты.
- 1.2. Зондирование среды упругими волнами (чаще-пассивное). Внутреннее строение Земли и ее частей.

(2) Очаг землетрясения.

- 2.1. Точечный излучатель, очаг-трещина, сейсмический момент.
- 2.2. Спектр излучения. Подобие очагов. Скейлинг.
- 2.3. Обратные задачи - реконструкция очагов
- 2.4. Динамическое моделирование очагов-трещин.

(3) Множество очагов – сейсмичность

- 3.1. Эпицентры и глубины. Магнитуда.
- 3.2. География сейсмичности. Распределение по энергии/моменту.
- 3.3. Механизмы очагов и поле напряжений Земли

Фундаментальная сейсмология – специальные разделы

- (4) Историческая сейсмология, макросейсмика, шкала интенсивности (баллы)
- (5) Сеймотектоника-сейсмогеология, палеосейсмология, сейсмодислокации
- (6) Микросейсмы, тихие землетрясения, шум Земли или сейсмический фон, сейсмическая эмиссия, шум как помеха
- (8) Сейсмология вулканов
- (9) Сейсмология взрыва

Сейсмометрия и наблюдения

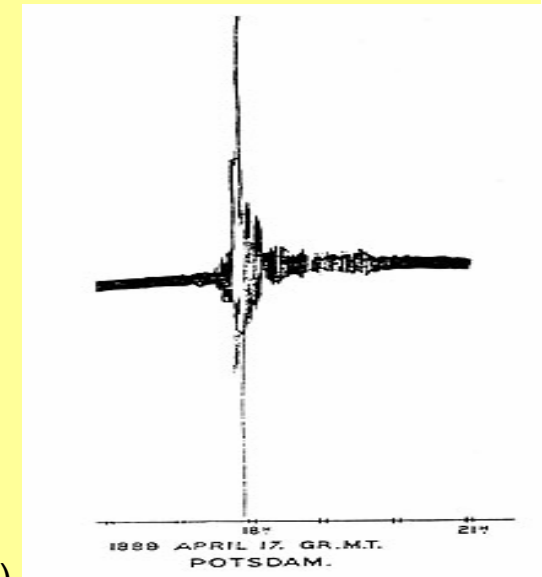
- (1) Приборы и регистраторы
- (2) Информационные системы и архивы
- (3) Сейсмические сети и группы (решетки)

Прикладная сейсмология

- (1) Сейсмическая опасность, общее сейсмическое районирование.
Инженерно-сейсмологические оценки на эмпирической основе.
- (2) Сейсмическое микрорайонирование - влияние грунтовой толщи на движения поверхности
- (3) Физическое моделирование возможных сильных движений грунта для использования в динамическом расчете сооружений
- (4) Обнаружение, дискриминация и оценка силы ядерных взрывов.
- (5) Землетрясение как источник цунами
- (6) Вызванная (наведенная) сейсмичность
- (7) Прогноз извержений вулканов, раннее предупреждение
- (8) Поиски предвестников землетрясений, другие подходы к их прогнозу

История

- 132 Чжан Хен: маятниковый сейсмоскоп-азимутограф
- 1088 Ибн Сина: горы растут шагами, каждый шаг-землетрясение
- 1889 Рёбер-Пашвиц: сейсмограмма
- 1904 Релей: теория поверхностных волн – начало теоретической сейсмологии
- 1910 Голицын: электромагнитный сейсмограф
- ~1908 Олдхем, Гутенберг: ядро
- 1910 Рейд: теория упругой отдачи
- 1923 Хонда: очаг - двойной диполь
- 1933 первая акселерограмма сильного движения
- 1935 Рихтер: магнитуда
- 1949 Гутенберг, Рихтер: степенная статистика энергии очагов
- 1957 Кейлис-Борок: сейсмический момент
- 1960 *рекорд сейсмического момента*; $M_w=9.6$ Чили
- 1960 Пресс: собственные колебания 57 мин
- 1962 Пресс и Бен-Менахем: инверсия очага –бегущей дислокации
- 1964-1966 Костров: динамический очаг-трещина
- 1967-1970 Аки, Брун: автомодельность очаговых спектров (спектр « ω^{-2} »)
- 1975 Канамори, Андерсон: автомодельный очаг
- 2004 *рекорд длины очага*: 1300 км Суматра
- 2006 *рекорд ускорения грунта*: 4.6 g Япония



Наука на перекрестке:

математика, механика
сплошной среды, физика,
геология, геодинамика,
география, обработка
сигналов, история и
археология

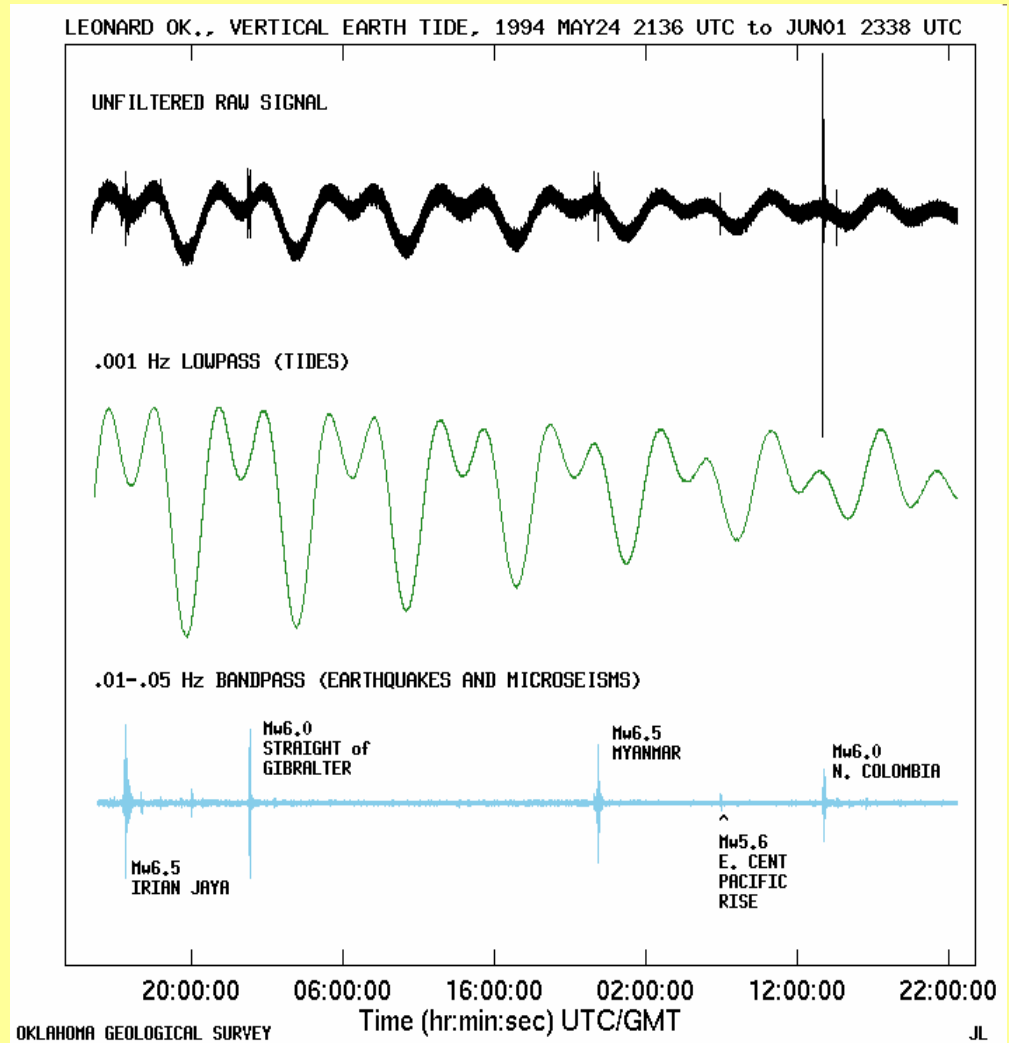
Международная наука

Диапазон амплитуд движений:
нанометры – десятки м

Диапазон масштабов объектов:
метры – 1000 км

Диапазон периодов: 1 час –
0.001 с

Молодая наука

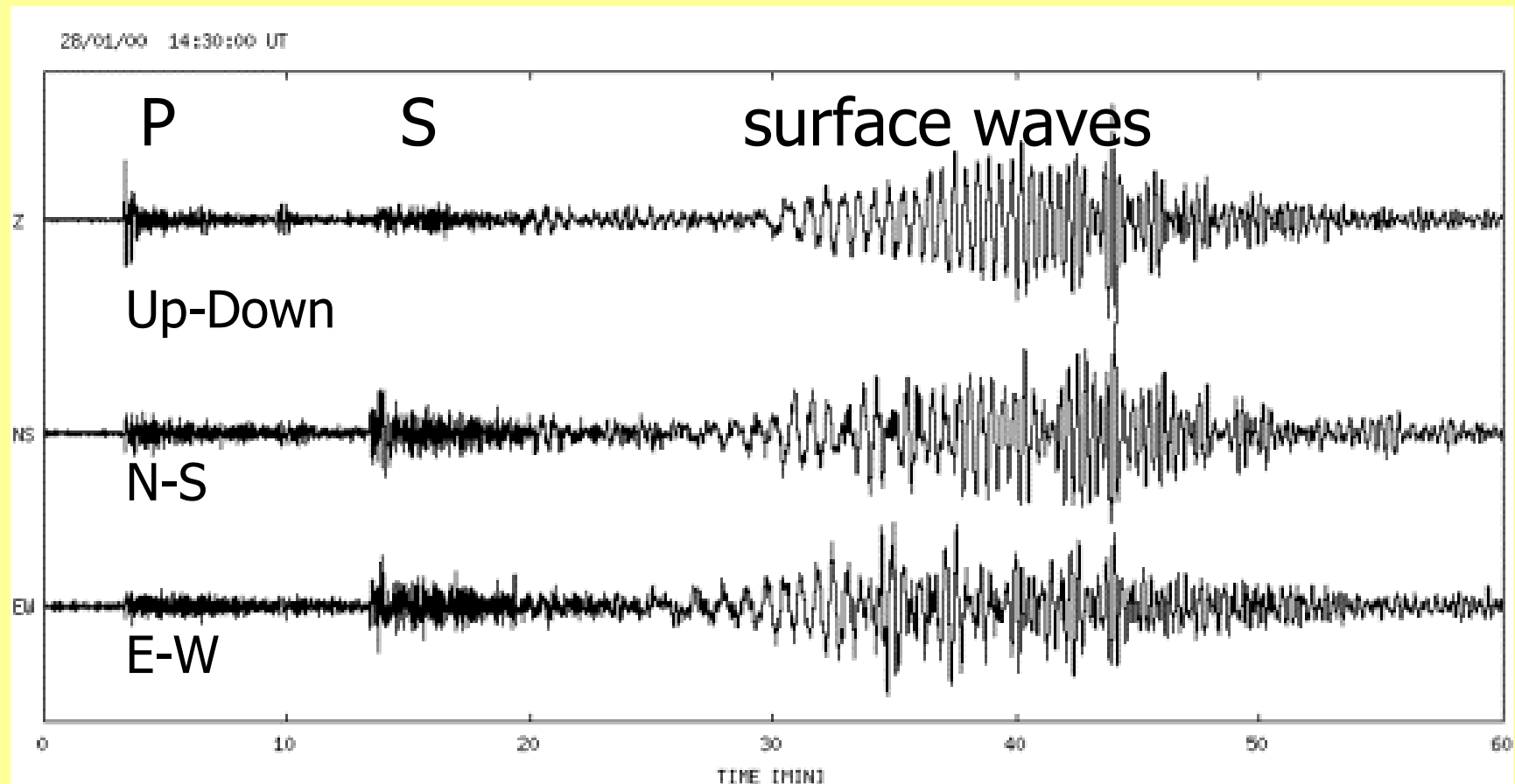


Seismogram

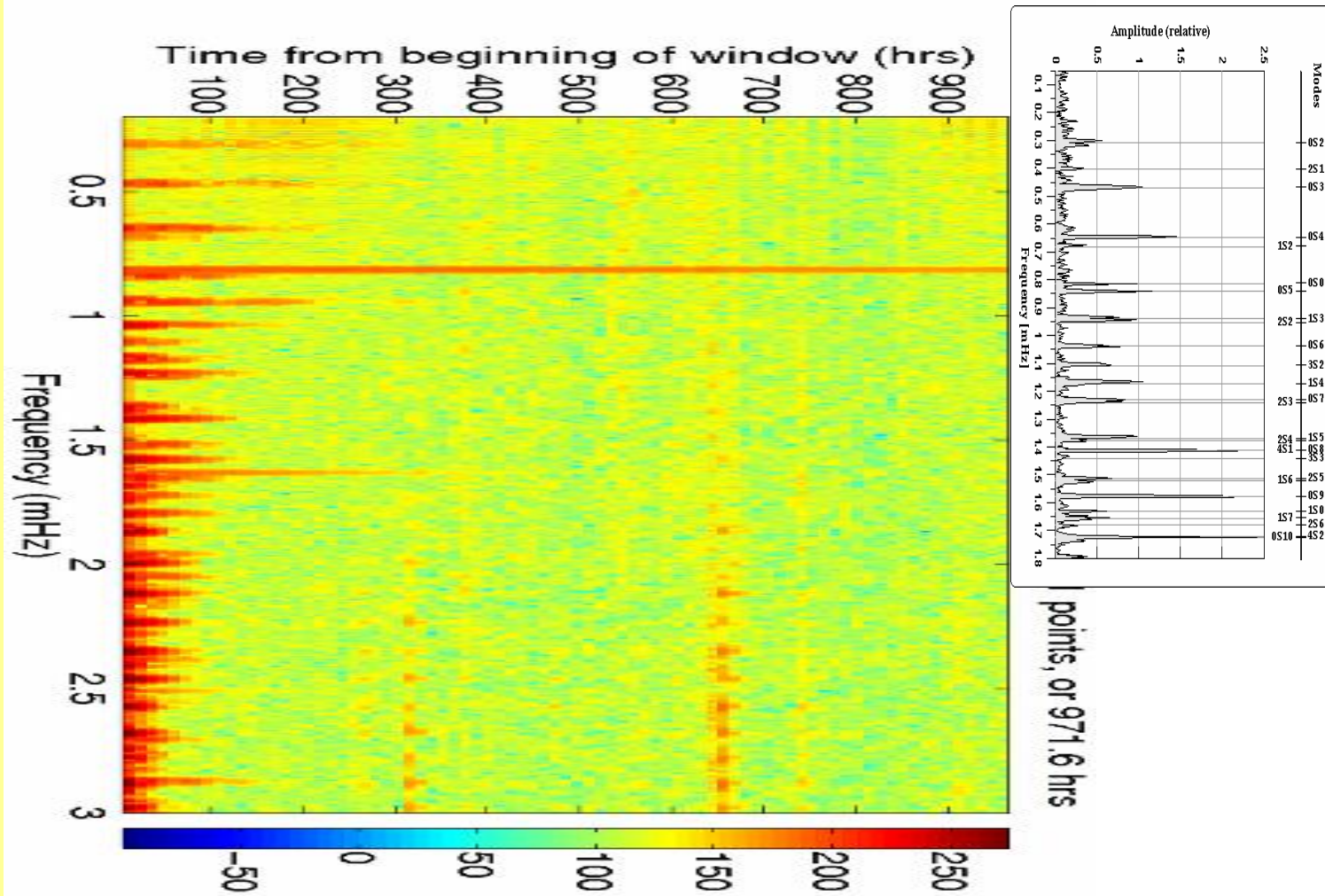
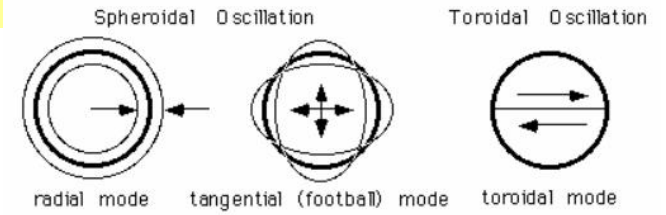
Earthquake in Japan

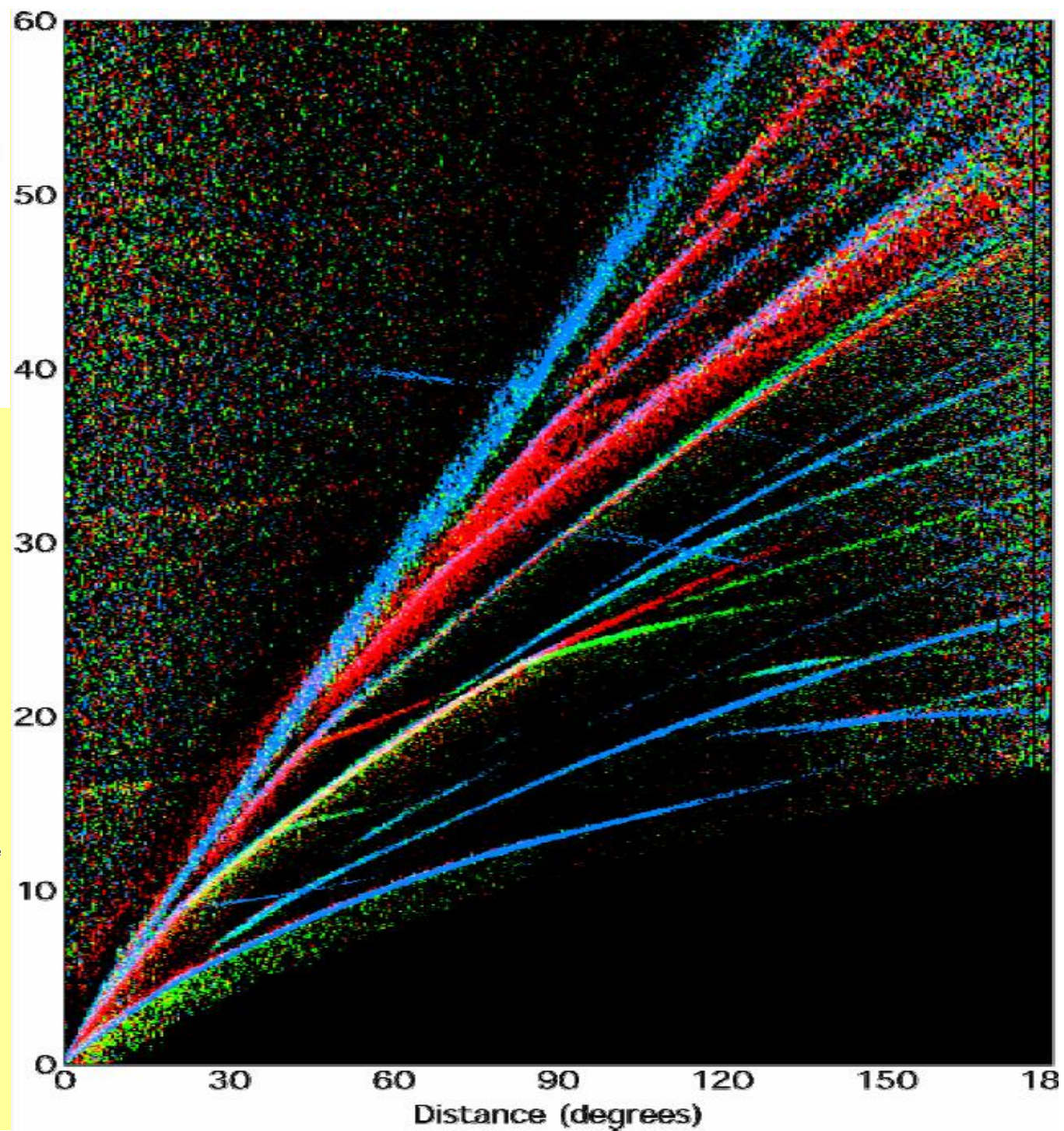
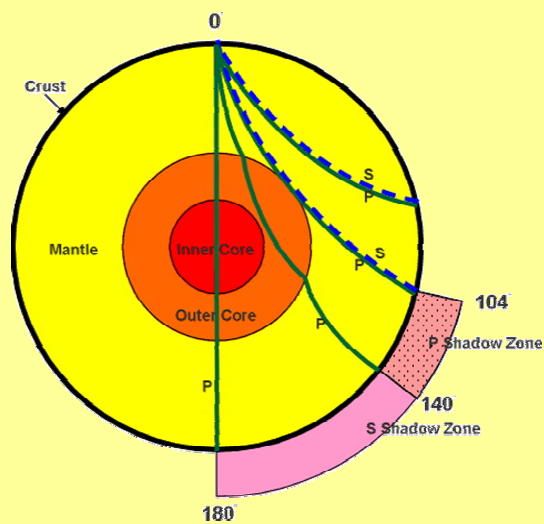
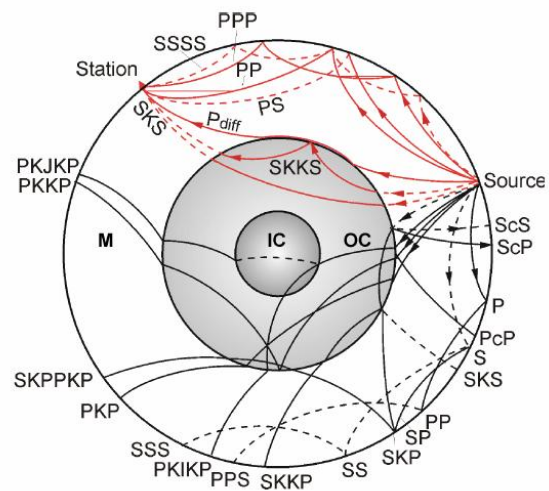
Station in Germany

Magnitude 6.5

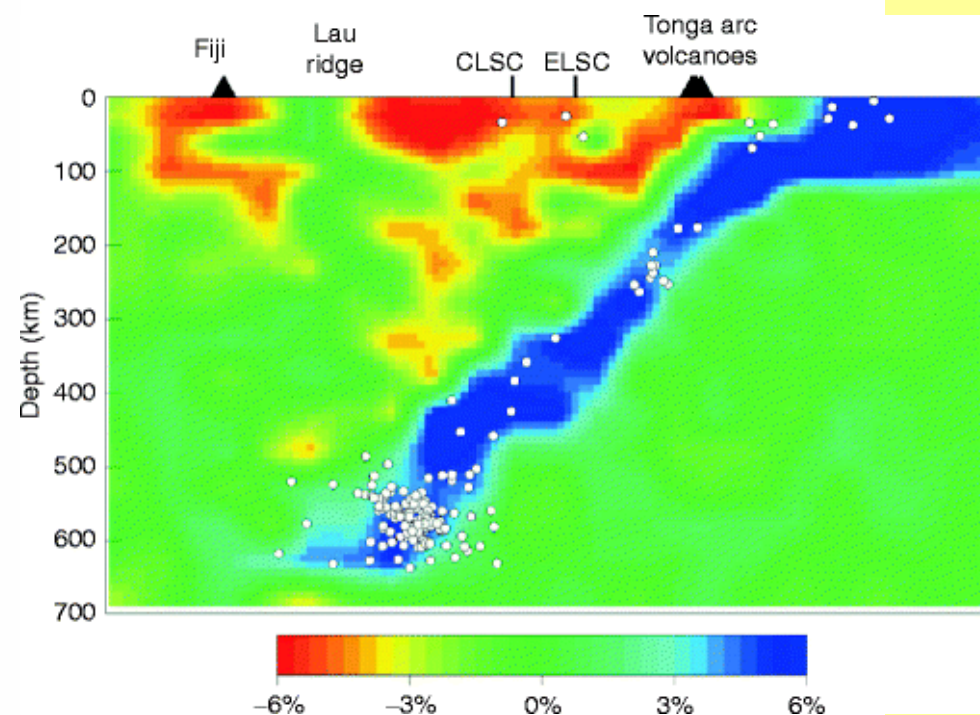
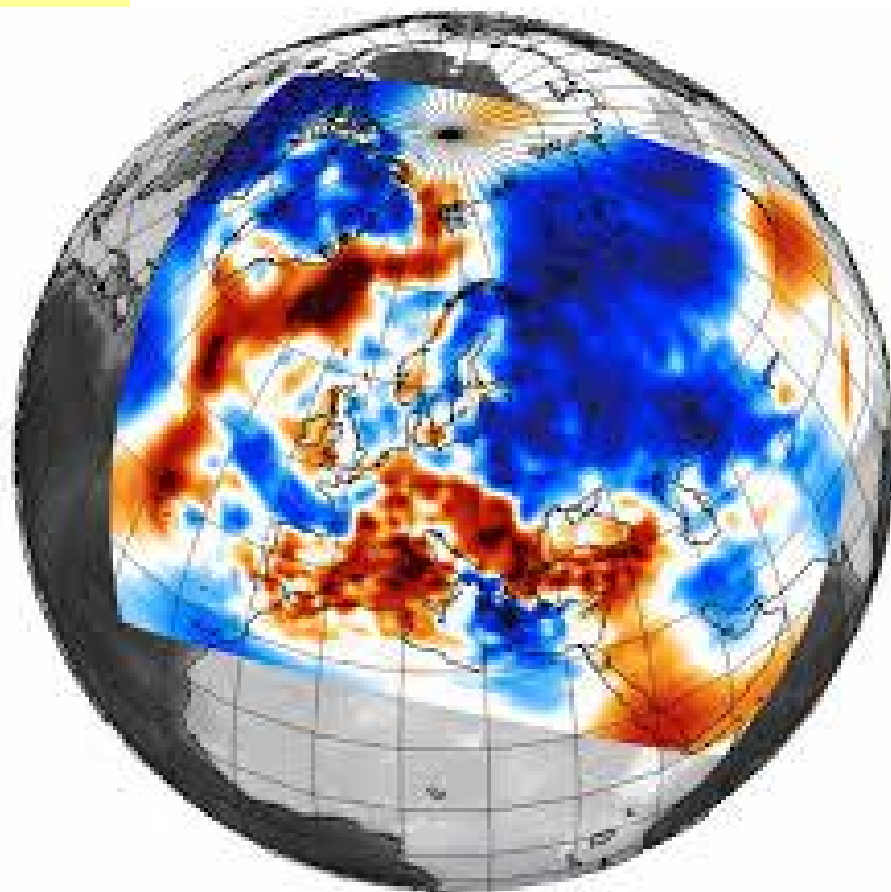


(1) Сейсмические волны и зондирование земных недр





1.1. Сейсмические волны как явление. Скорость, затухание, анизотропия, дисперсия, рассеяние. Поверхностные волны и собственные колебания планеты.



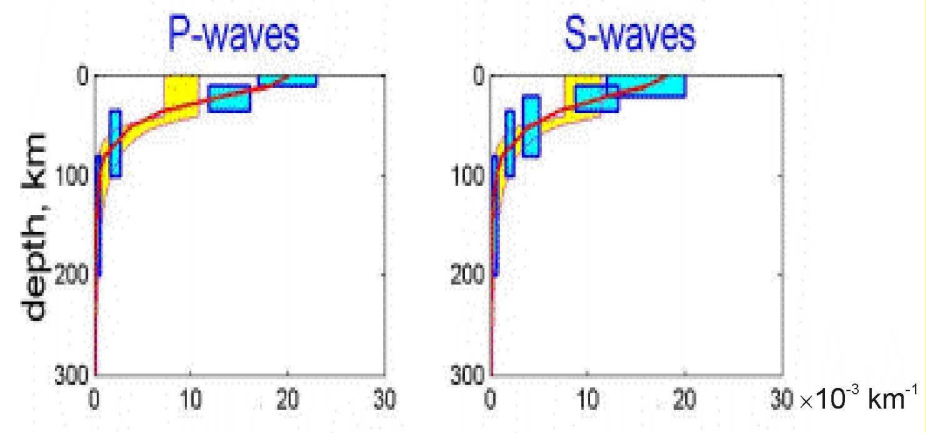
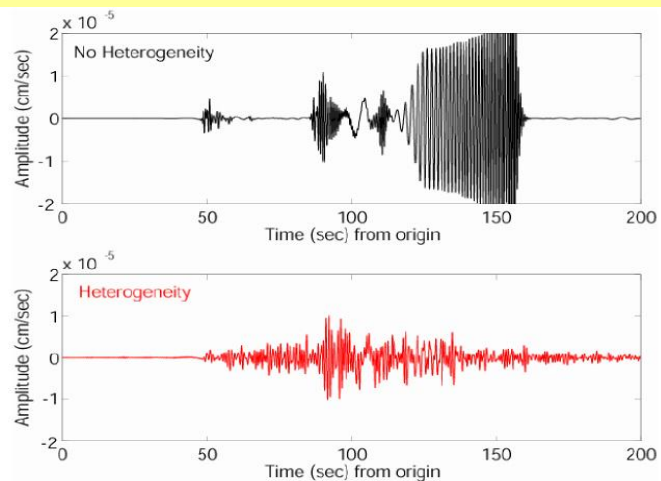
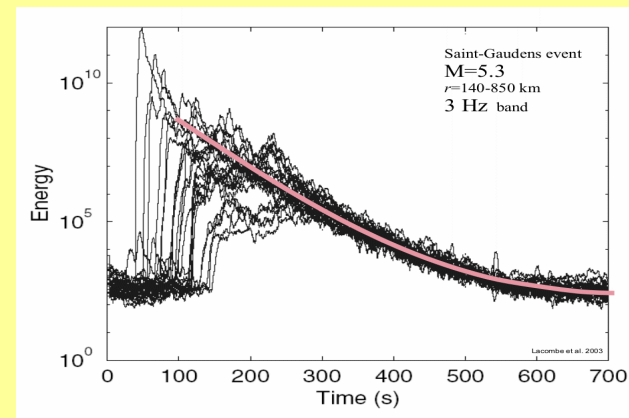
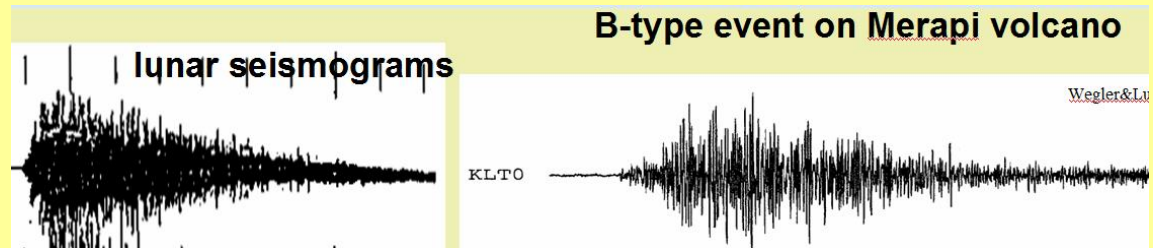
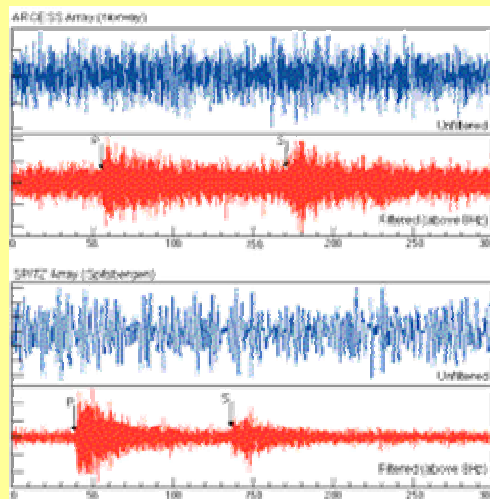


Figure 4. A comparison of synthetics for a composite explosion plus CLVD source in a Shagan test site velocity model without (upper) and with (lower) stochastic variations. In the lower plot, the *Lg* coda behaves very similarly to regional recordings of explosions at the Shagan Test Site.

(2) Очаг землетрясения.

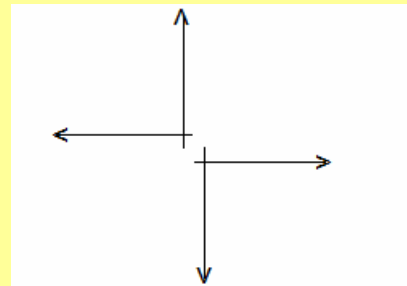
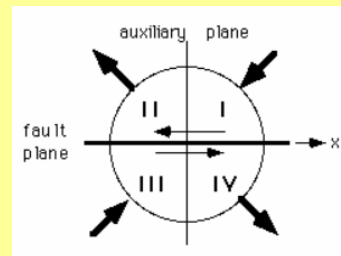
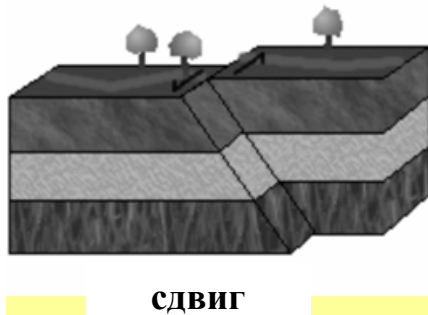
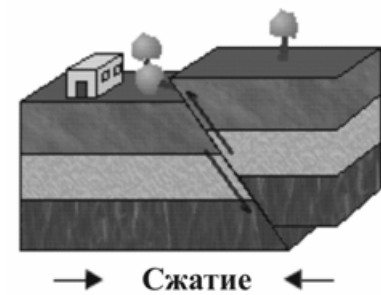
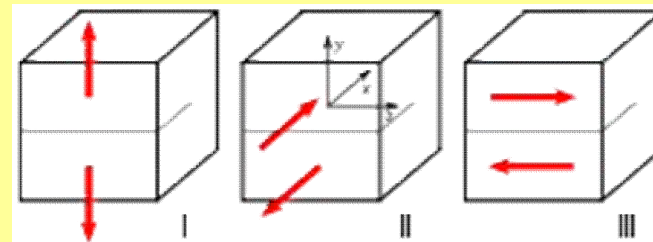
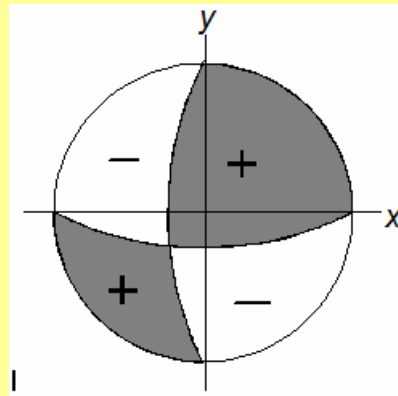
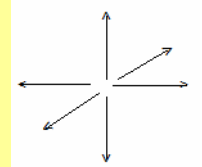


Рис.5.11. Двойная пара сил с моментом

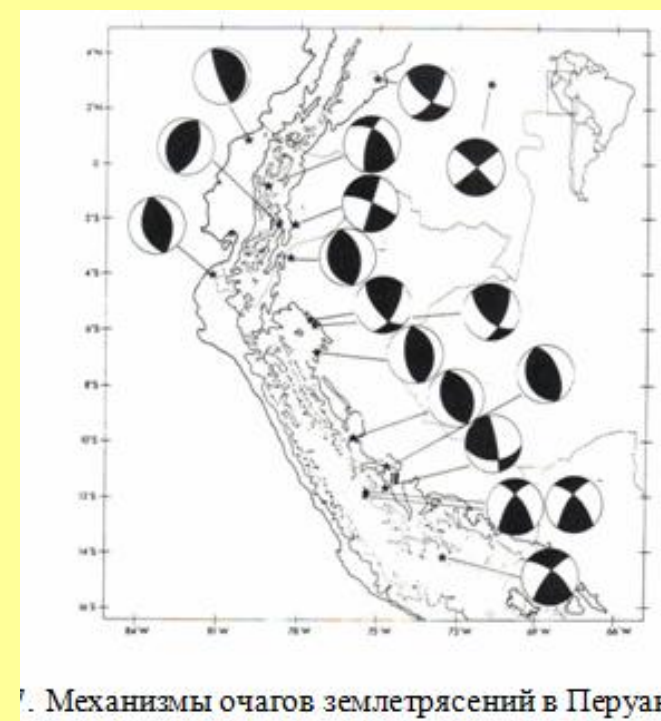
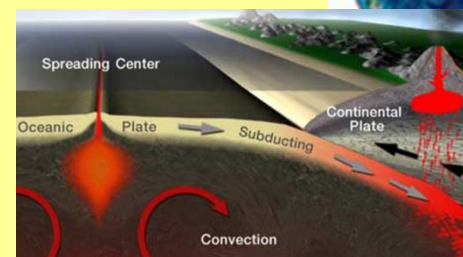
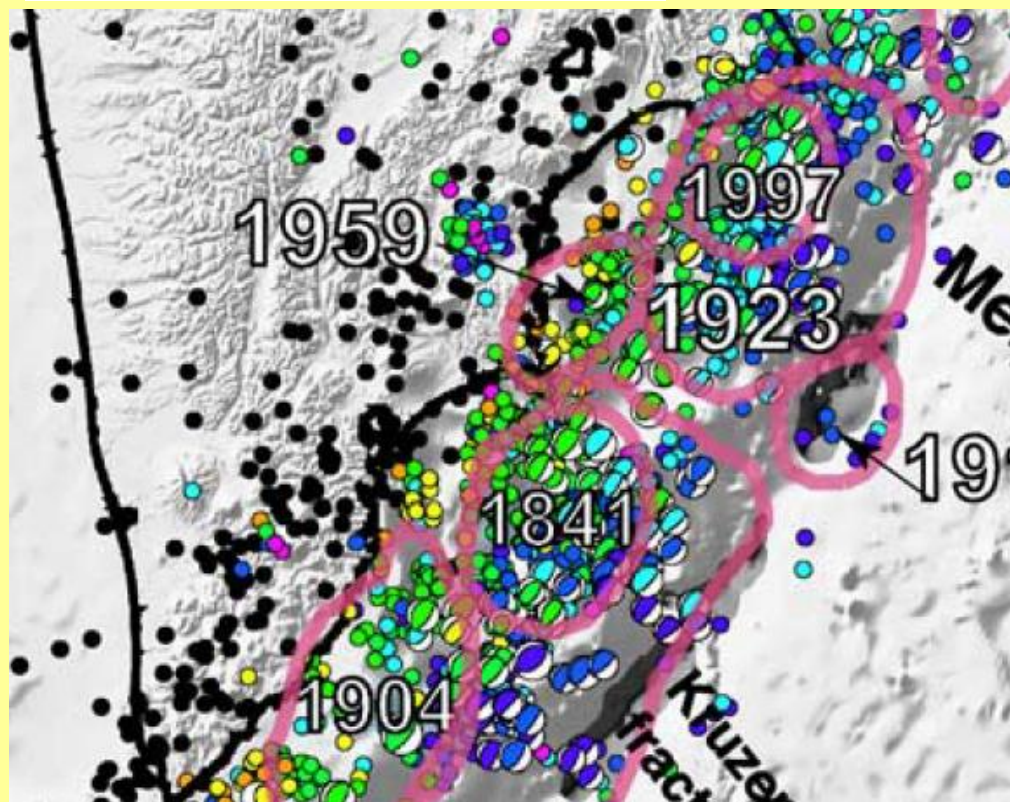
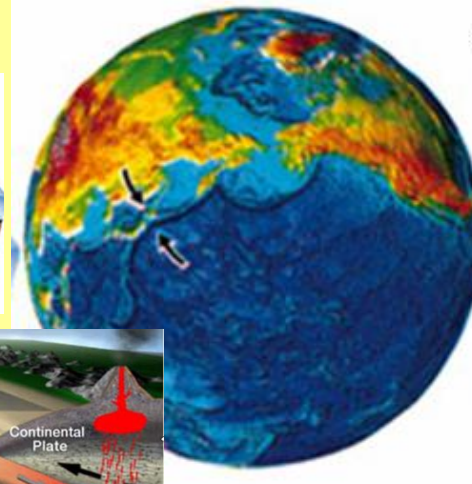
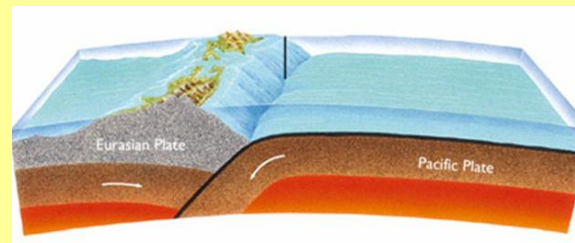
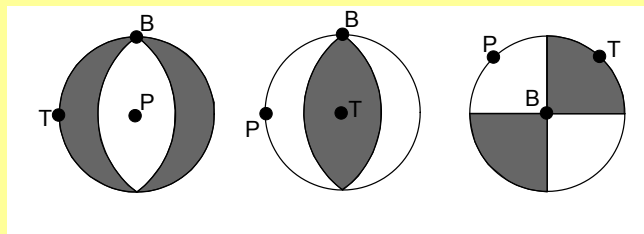


$$\begin{vmatrix} 0 & pF & 0 \\ pF & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & M_{12} & 0 \\ M_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \mu DS & 0 \\ \mu DS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$



$$\begin{vmatrix} kV & 0 & 0 \\ 0 & kV & 0 \\ 0 & 0 & kV \end{vmatrix}$$





Механизмы очагов землетрясений в Перуано

Подобие и скейлинг

Базовая величина:

сейсмический момент $M_0 = \mu DS \sim L^3$ [н м]

Подобие:

сброшенная деформация $\varepsilon \approx \text{const}$

скорость испаривания $v \approx \text{const}$

отн. удлинение площадки $L/W \approx \text{const}$

Тогда: длина очага $L \sim M_0^{1/3}$

площадь очага $S = L \times W \sim M_0^{2/3}$

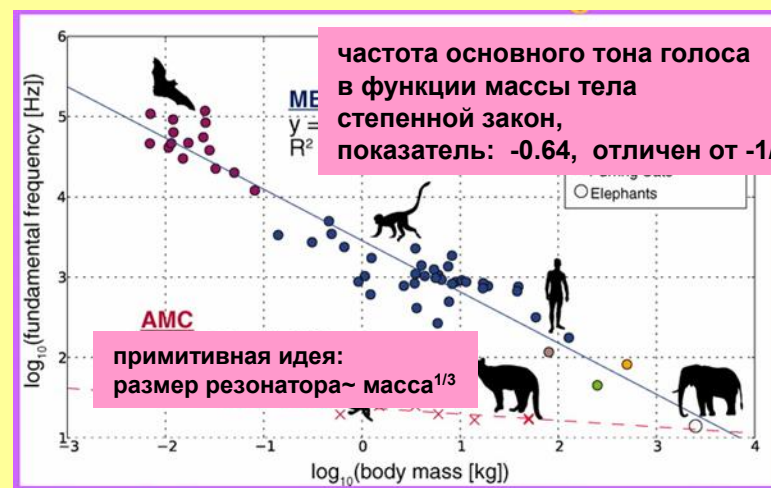
длительность разрыва $T \approx L/v \sim M_0^{1/3}$

характерная частота $f_c \approx 1/T \sim M_0^{-1/3}$

сейсмическая энергия $E \sim M_0$

Подобие нарушено, характерных размеров нет:

$\Rightarrow$ степенной скейлинг; например $E \sim M_0^{1.2}$



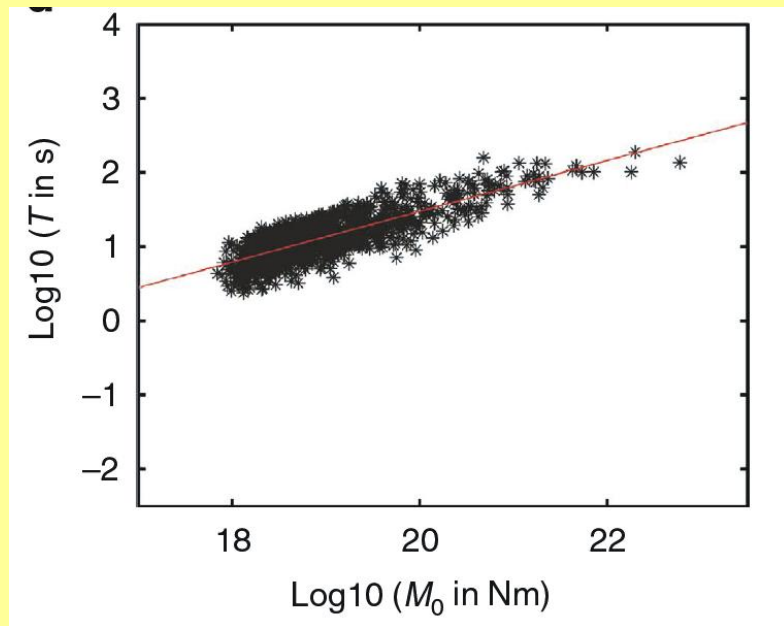
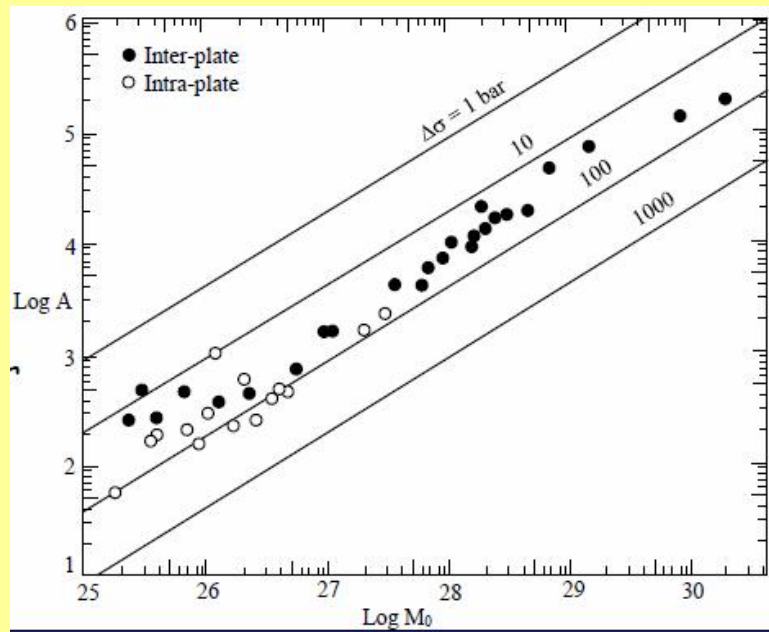
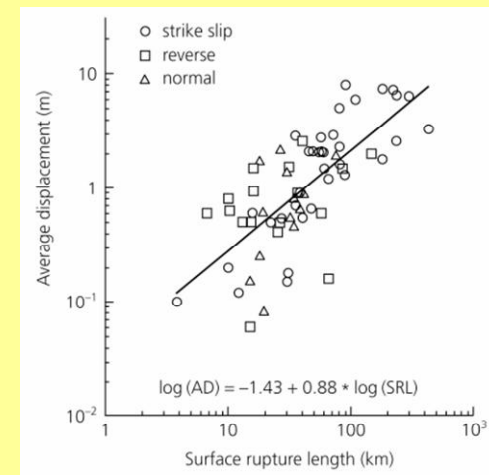
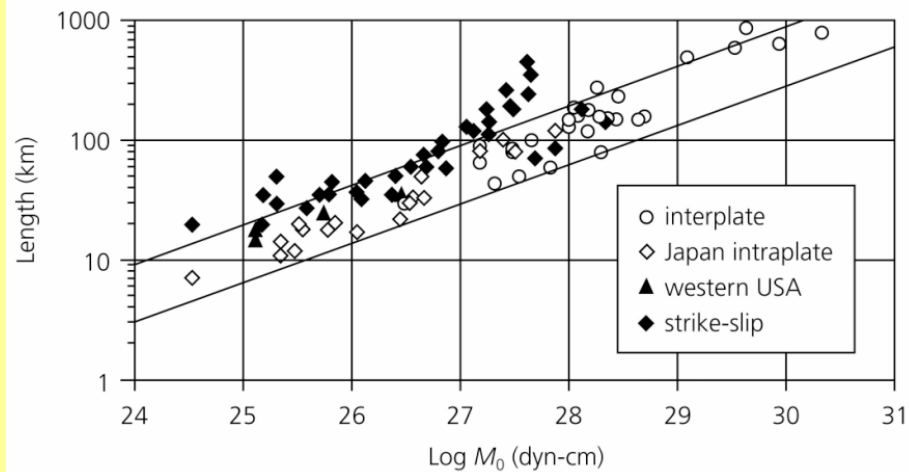
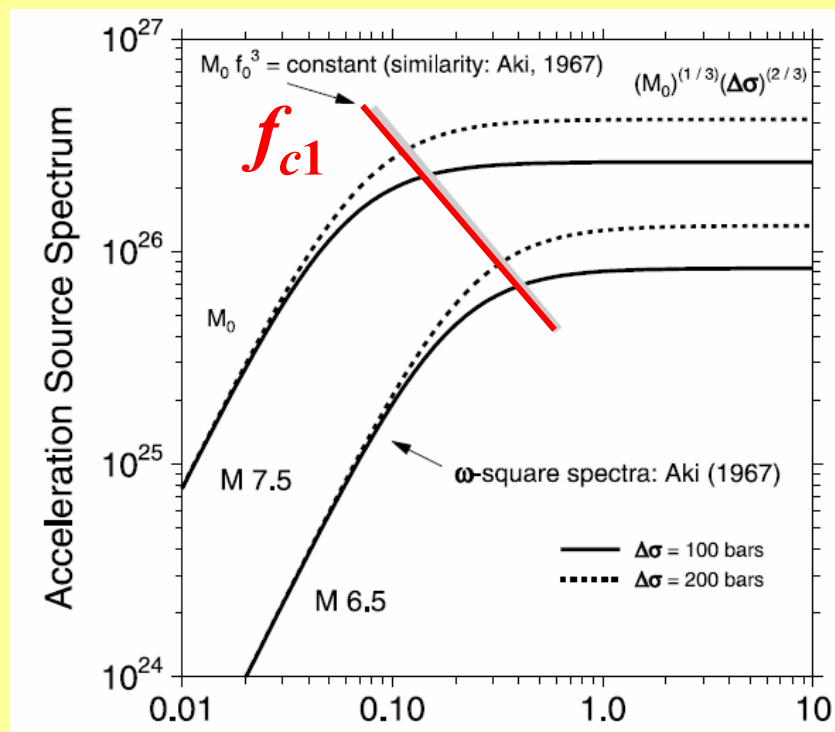


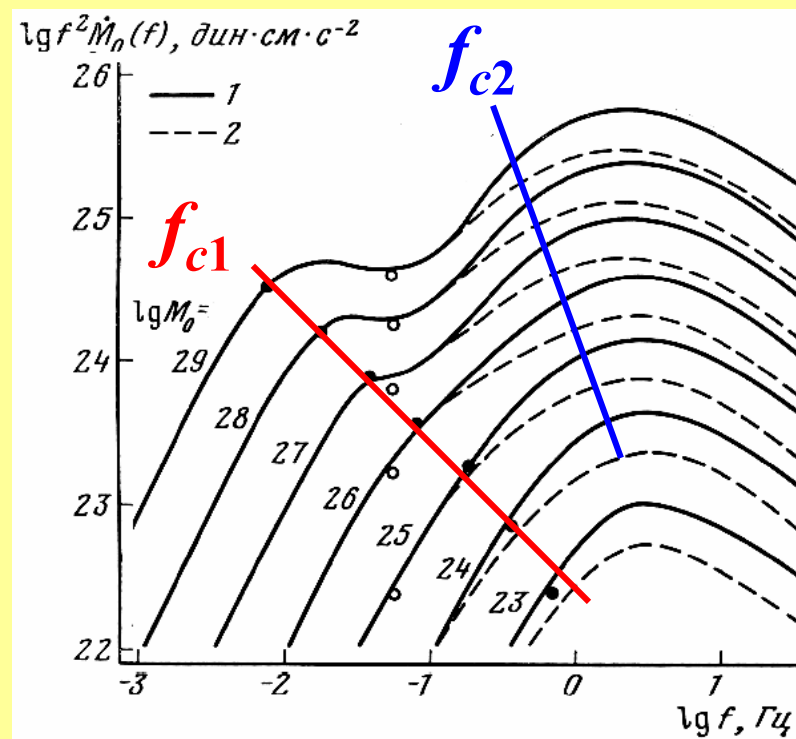
Figure 4.7-3: Relationship between seismic moment and fault length for different earthquake types.



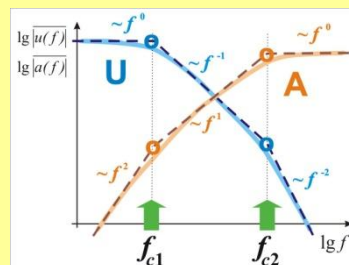
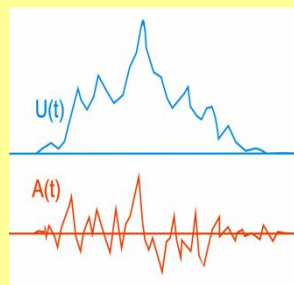
Скейлинг очаговых спектров (ускорения)



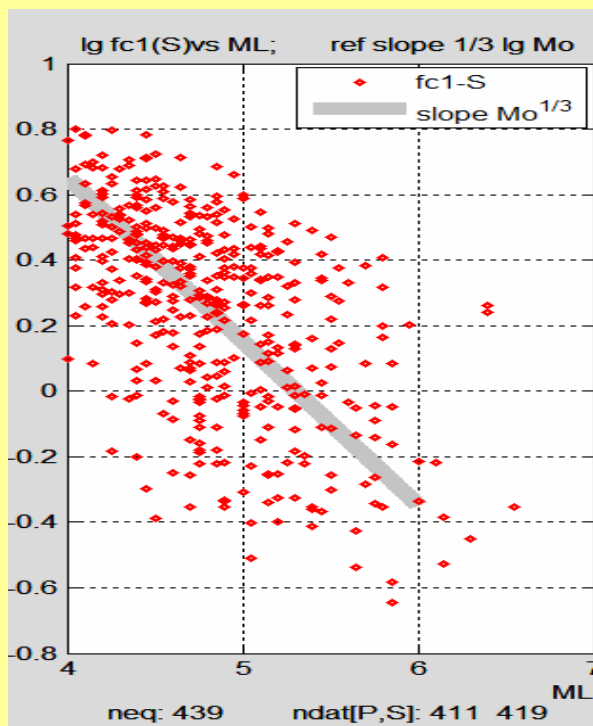
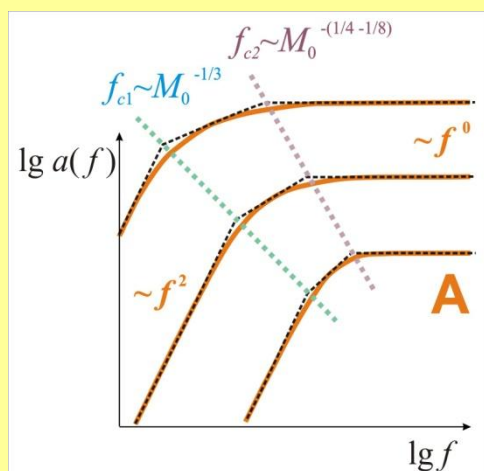
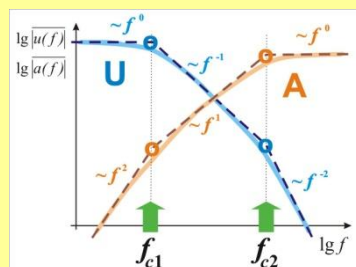
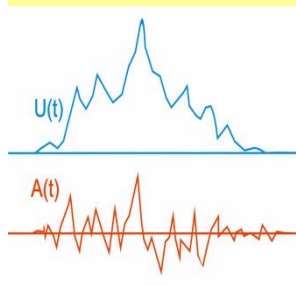
Подобие (Аки1967)



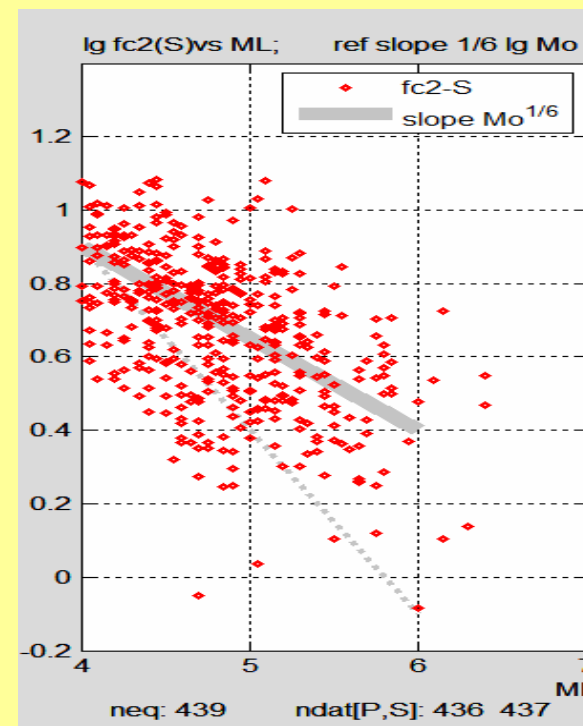
Нарушение подобия (Гусев 1983)



Нарушение подобия для второй корнер частоты очагового спектра землетрясений Камчатки



$$f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$$



$$f_{c2} \sim M_0^{-1/6}$$

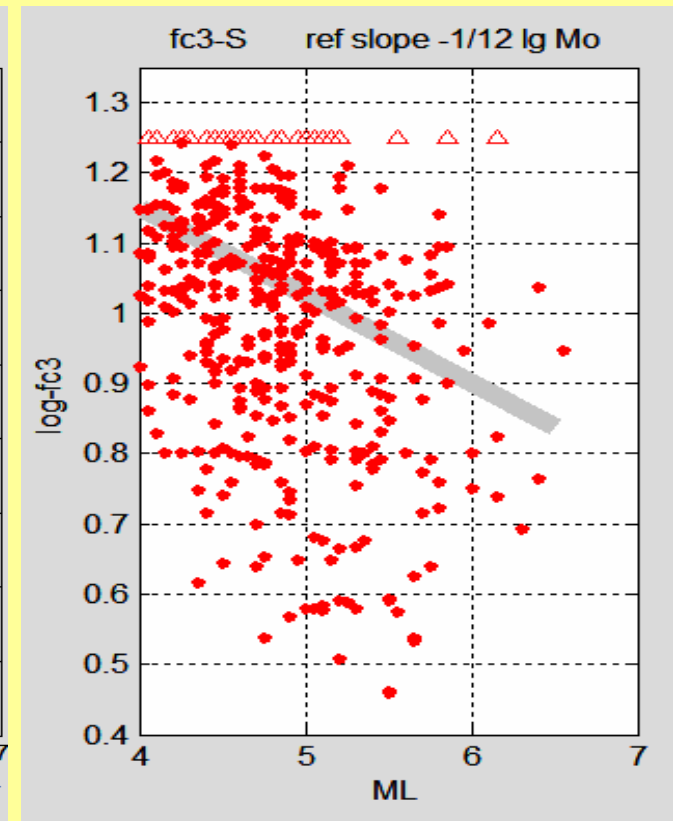
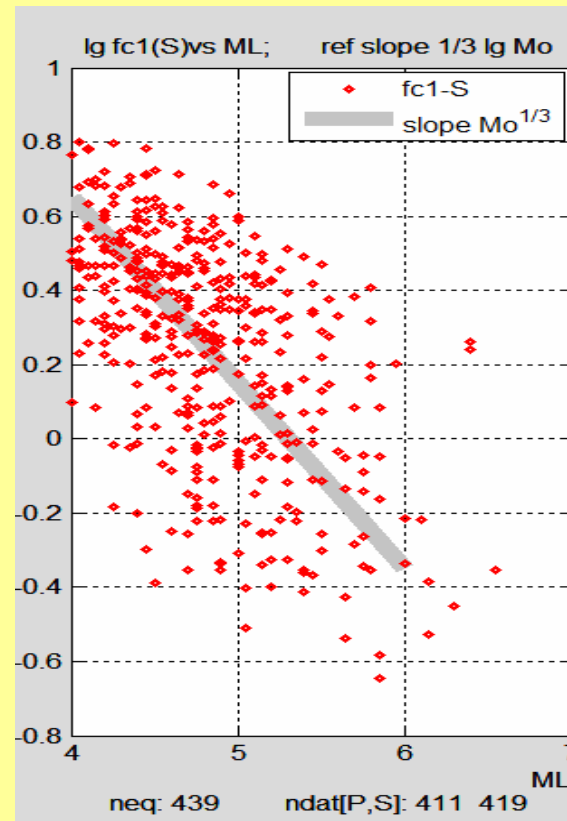
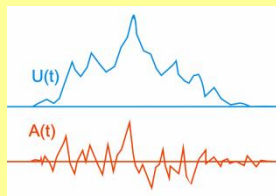
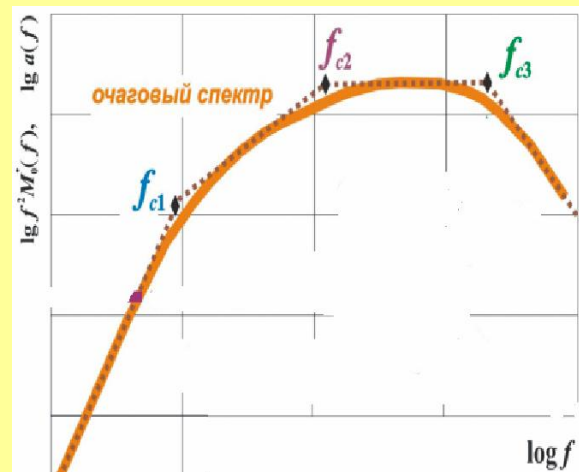
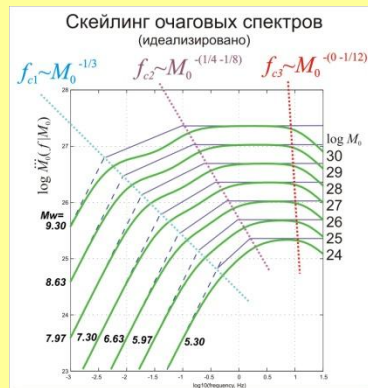
U - очаговый спектр смещения:

$$U(f) = |\text{ПФ}(\text{сигнал смещения при } r=1 \text{ км})|$$

A - очаговый спектр ускорения;

$$A(f) = (2\pi f)^2 U(f)$$

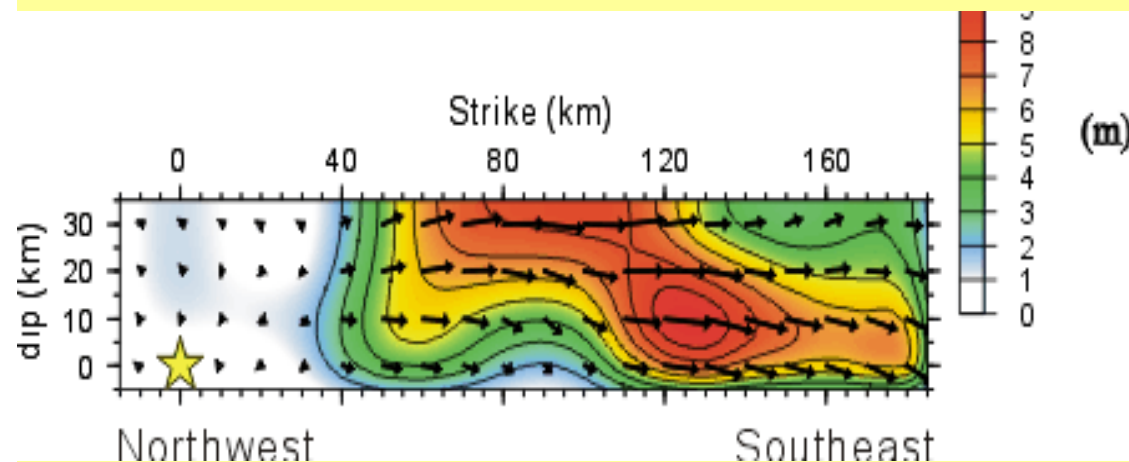
Нарушение подобия для третьей корнер частоты очагового спектра



$$f_{c1} \sim M_0^{-1/3}$$

$$f_{c3} \sim M_0^{-1/12}$$

Обратные задачи для движения в очаге

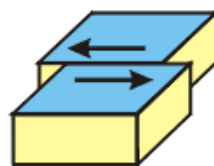
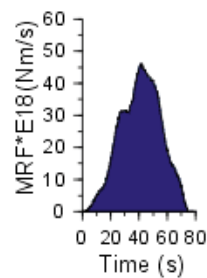


New Ireland 2000/11/16 (Ms 8.0)

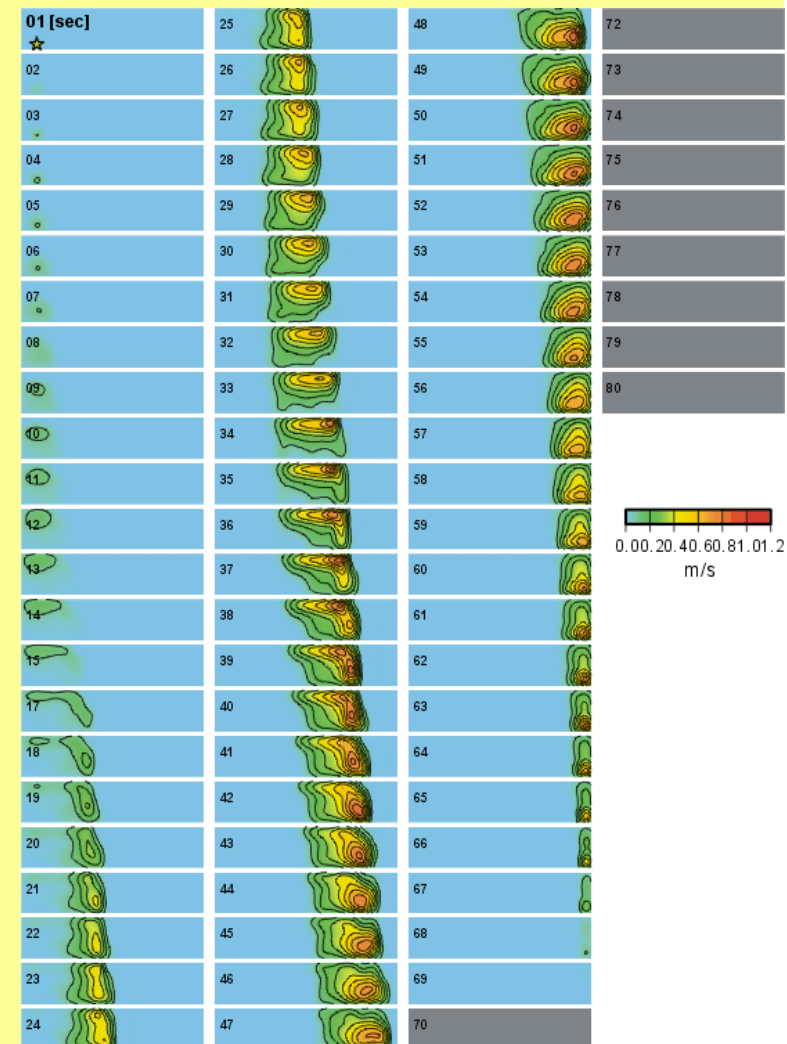
Moment = $0.156E+22$ (Nm), $M_w = 8.1$

(Strike, Dip, Slip) = (143.0, 83.0, -5.8)

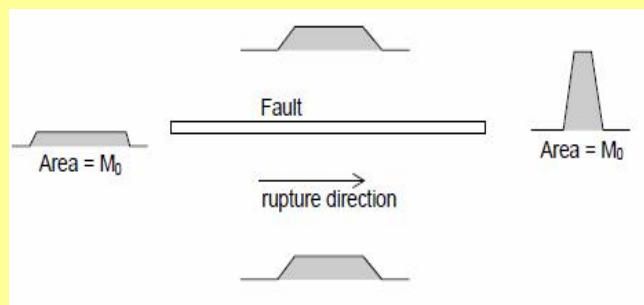
Y. Yagi and M. Kikuchi (2000)



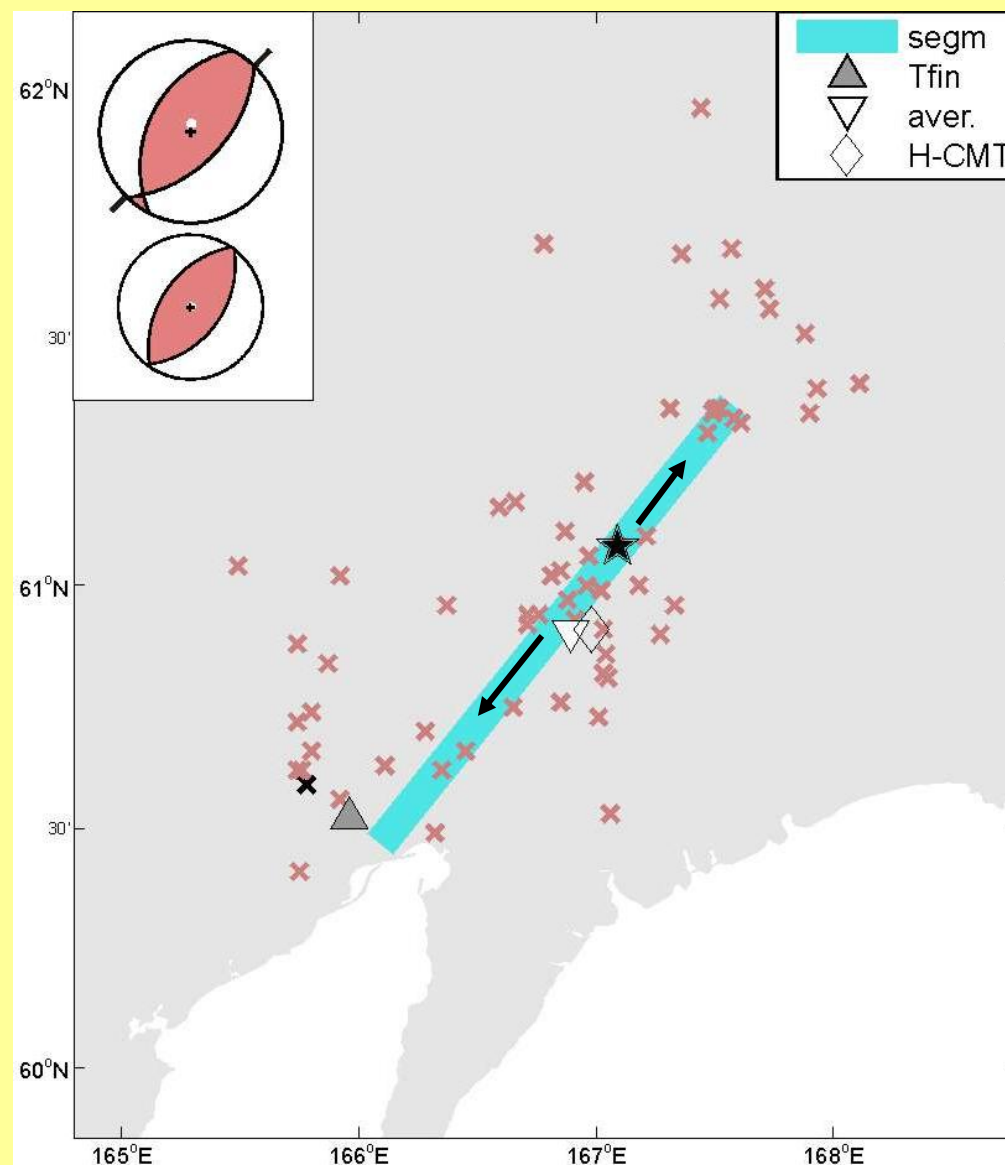
10
q



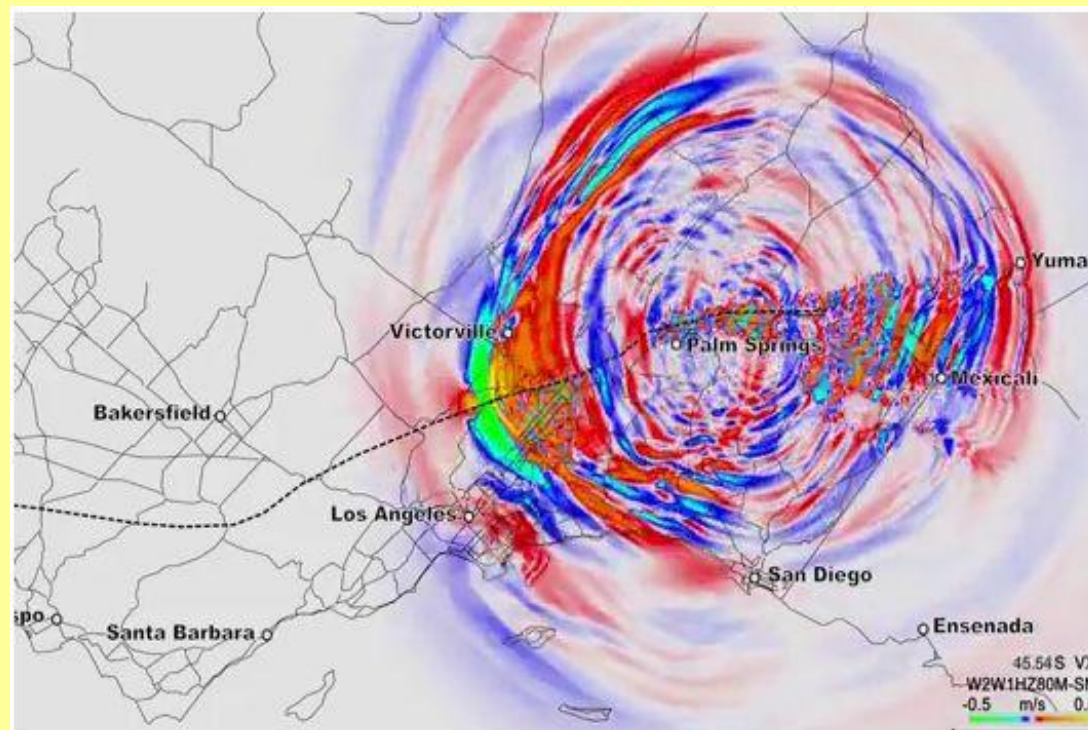
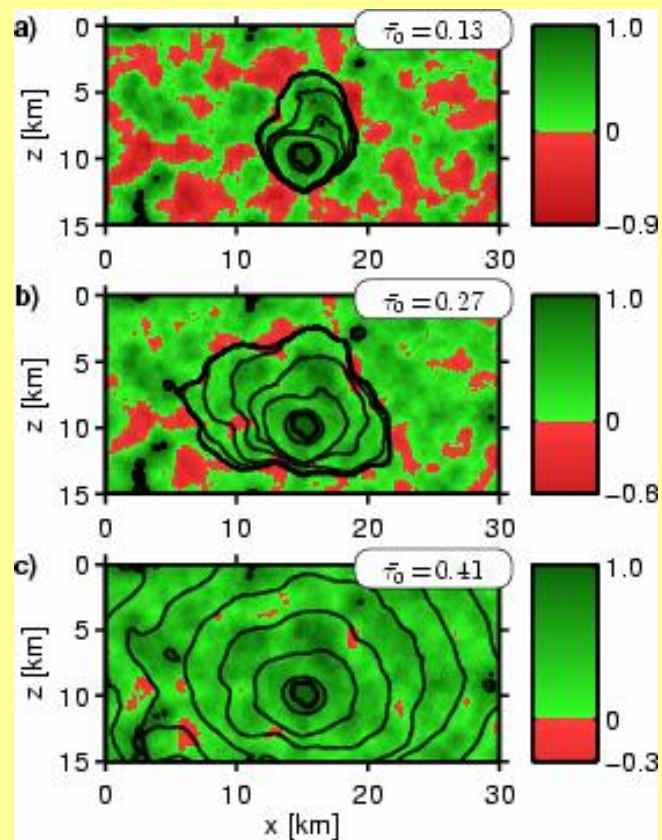
Реконструкция параметров очага землетрясения 20.04.2006 в Корее по записям телесейсмических высокочастотных Р-волн



Длина разрыва: ≈ 128 км
 Направление вспарывания: $229^\circ \pm 18^\circ \text{SW}$
 (длинное плечо 87 ± 30 км)
 и (двустороннее вспарывание) 49°NE
 (короткое плечо ≈ 41 км)
 Длительность: $35 \pm$ с
 Скорость вспарывания: 2.5 ± 0.8 км/с

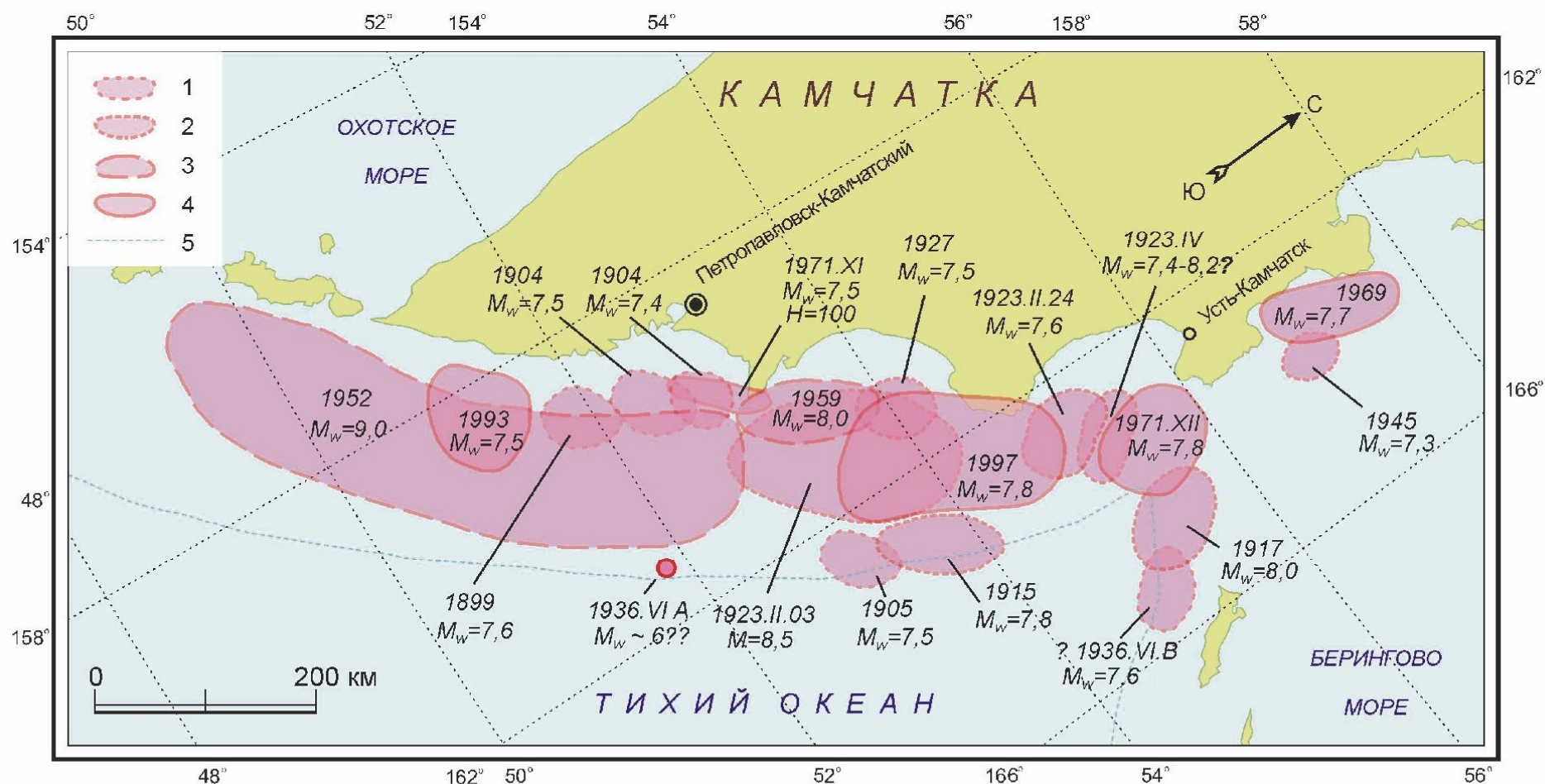


Прямые задачи для движения в очаге – реалистическая динамика трещины в 3D модели среды



(3) Множество очагов – сейсмичность, одновременно - исходные данные для расчета сейсмической опасности

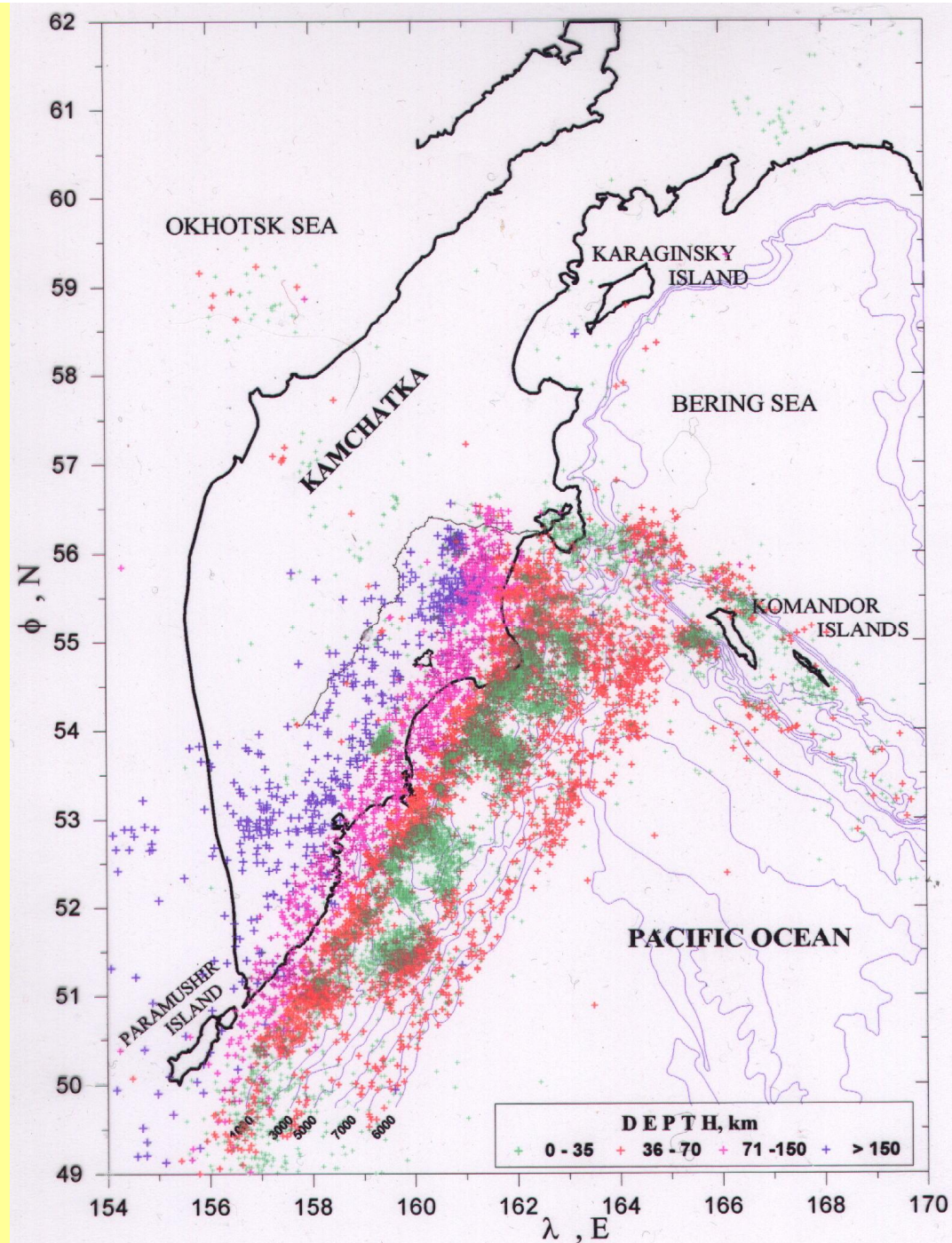
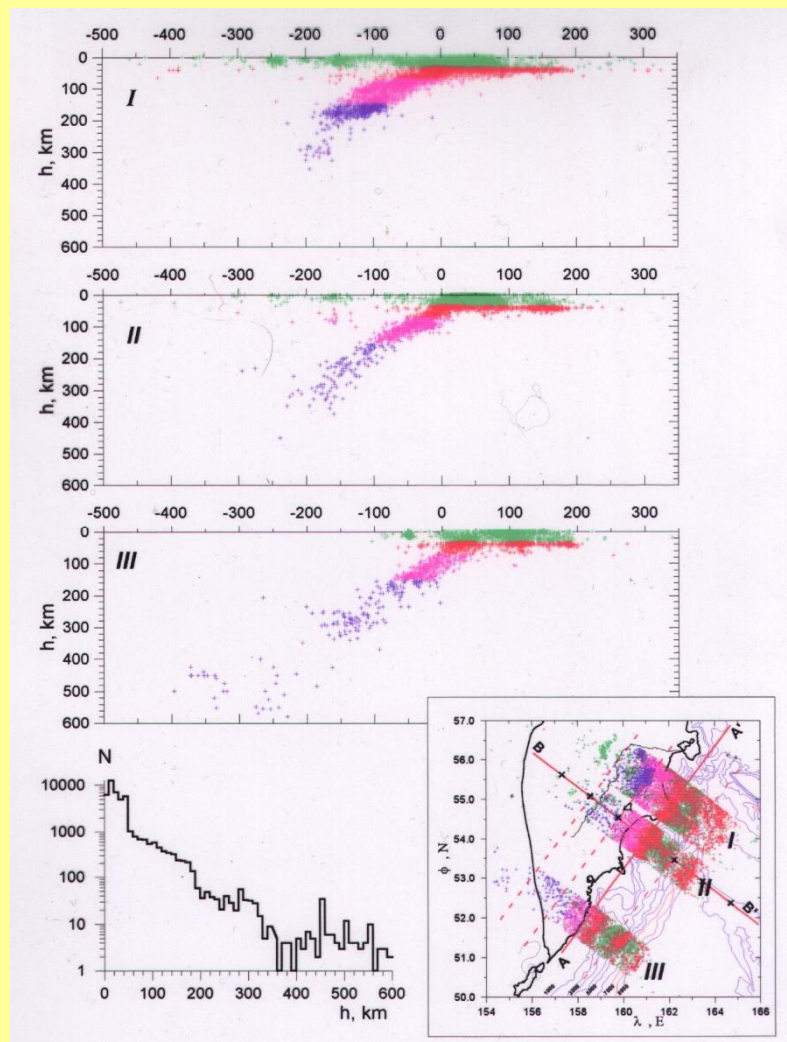
Схема расположения очагов сильнейших землетрясений Камчатки с 1899 г.



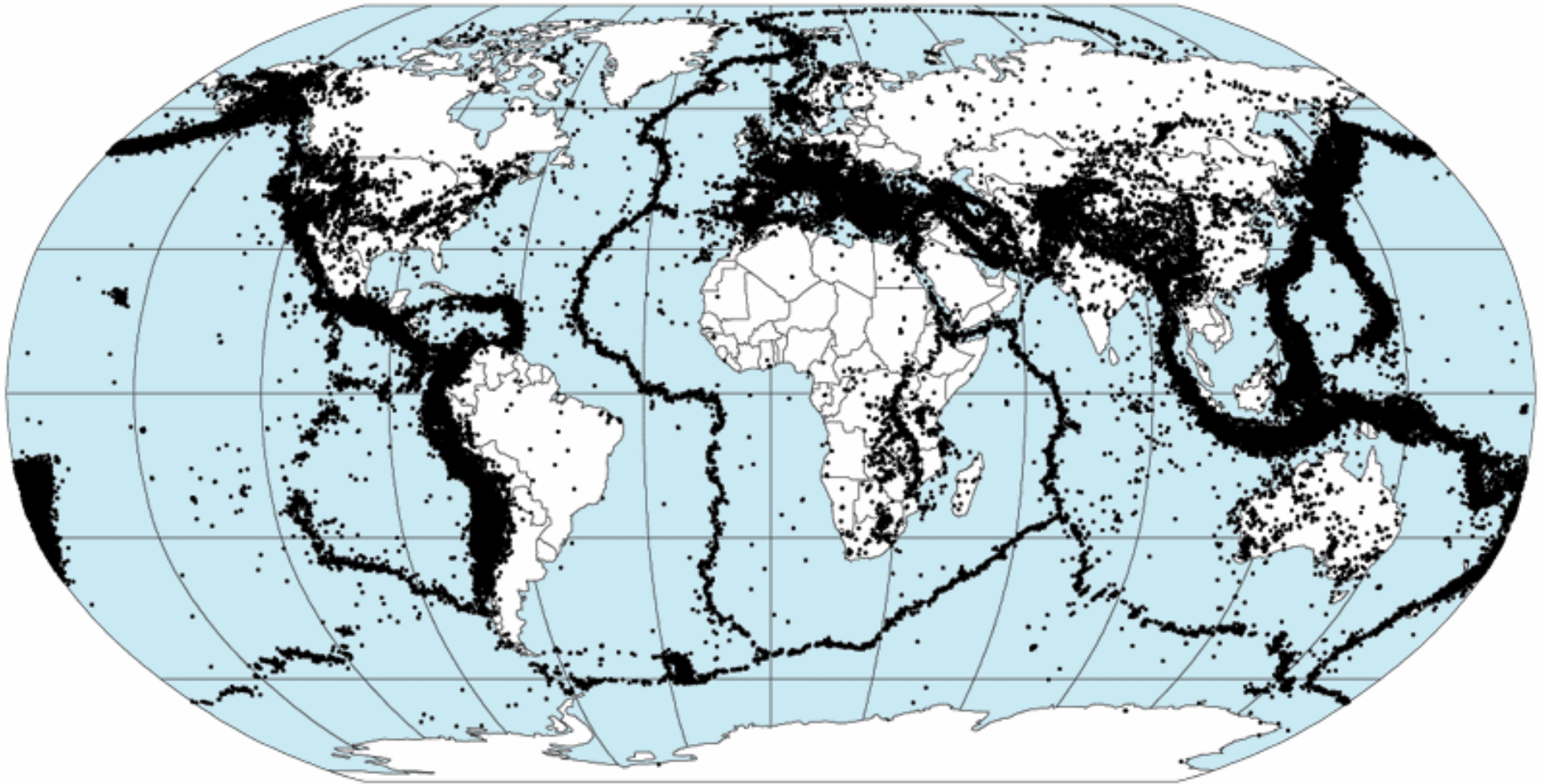
Контурсы очагов: 1- возможные, 2 - ориентировочные, 3- менее надежные, 4 - относительно надежные, 5 - осевая линия глубоководных желобов.

На схеме отражен результат пересмотра истории сильных землетрясений XX века

Исходные данные для расчета сейсмической опасности: сейсмичность II



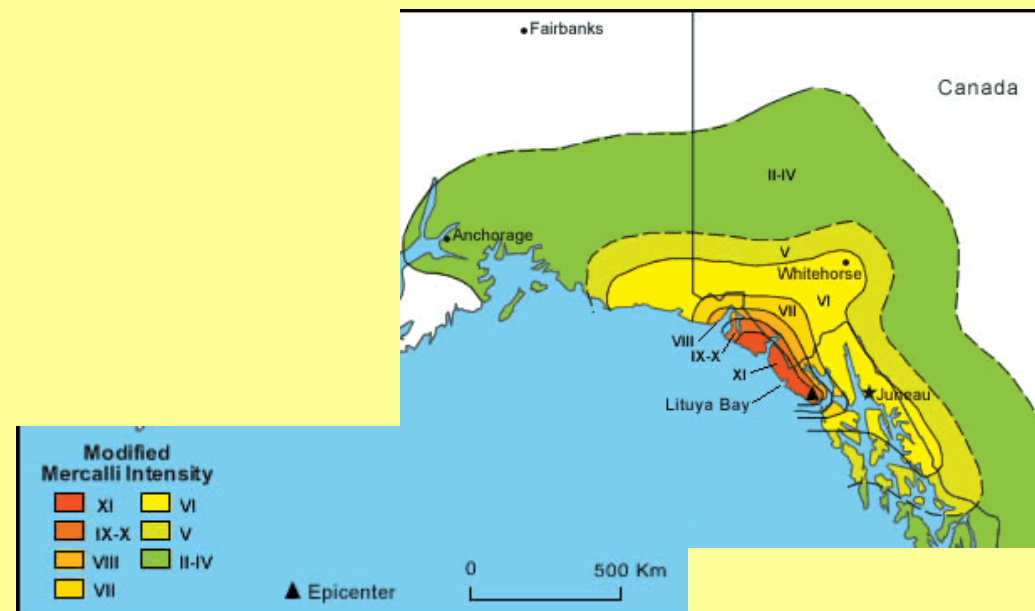
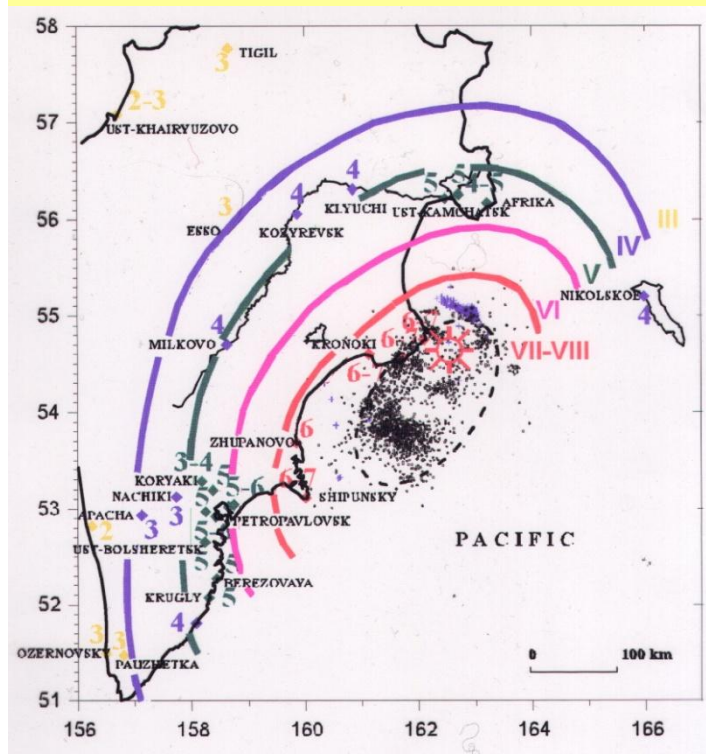
Мировая сейсмичность



Preliminary Determination of Epicenters
358,214 Events, 1963 - 1998

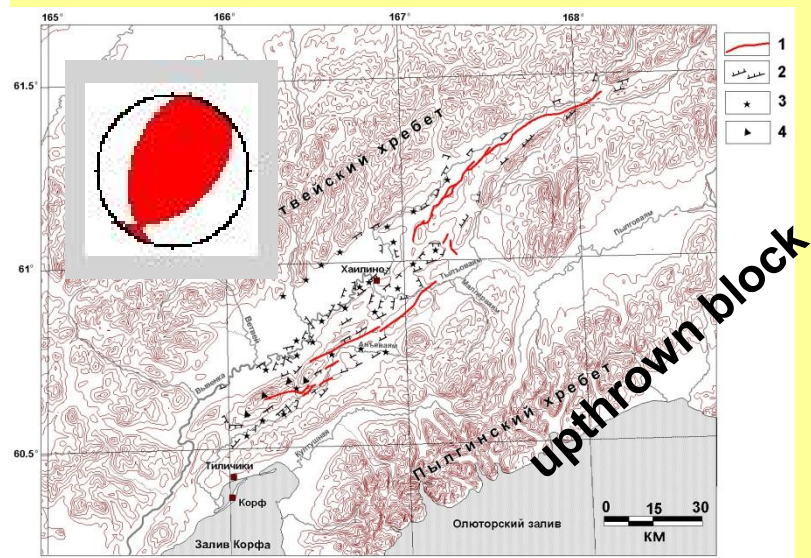
Историческая и макросейсмология, полевые наблюдения

У одного очага-
одна магнитуда,
но много баллов:
чем дальше, тем
меньше

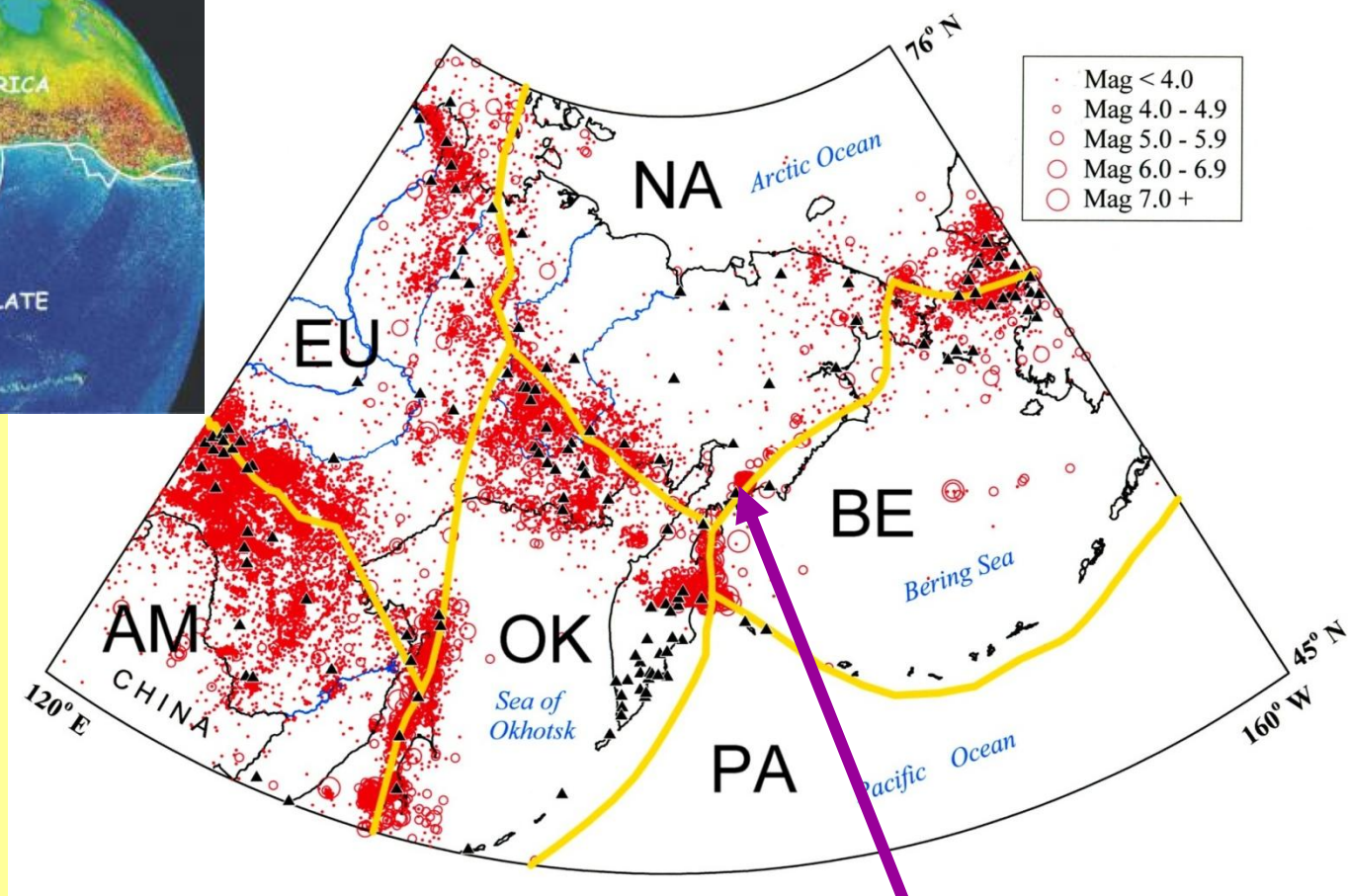
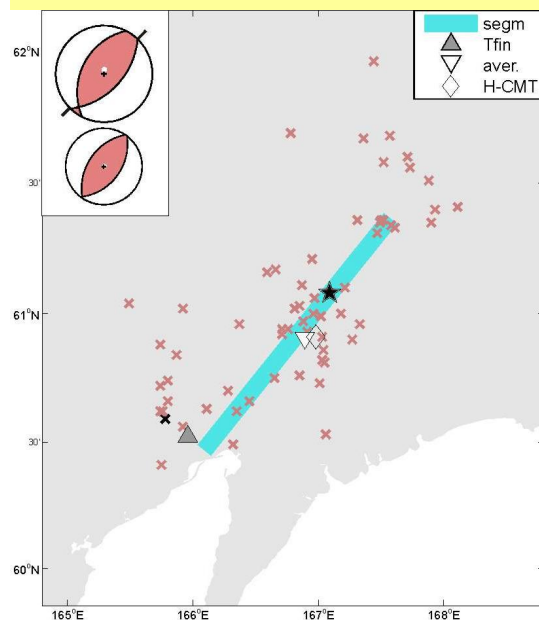
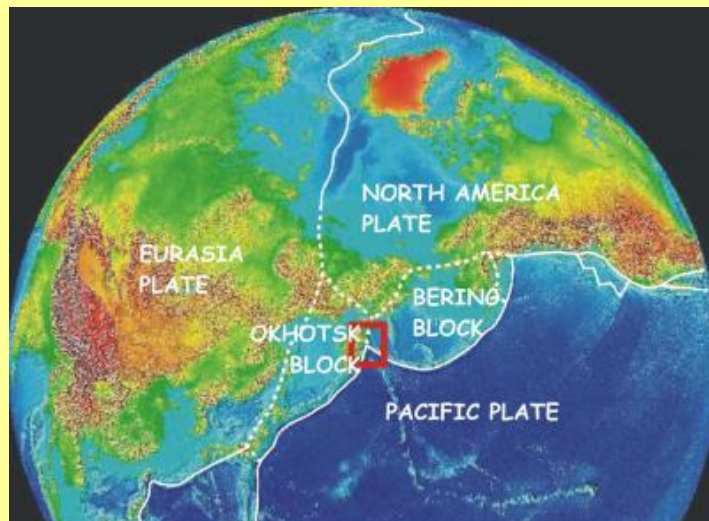




Полевые наблюдения очагового разрыва землетрясения 20.04.2006 в Корякии



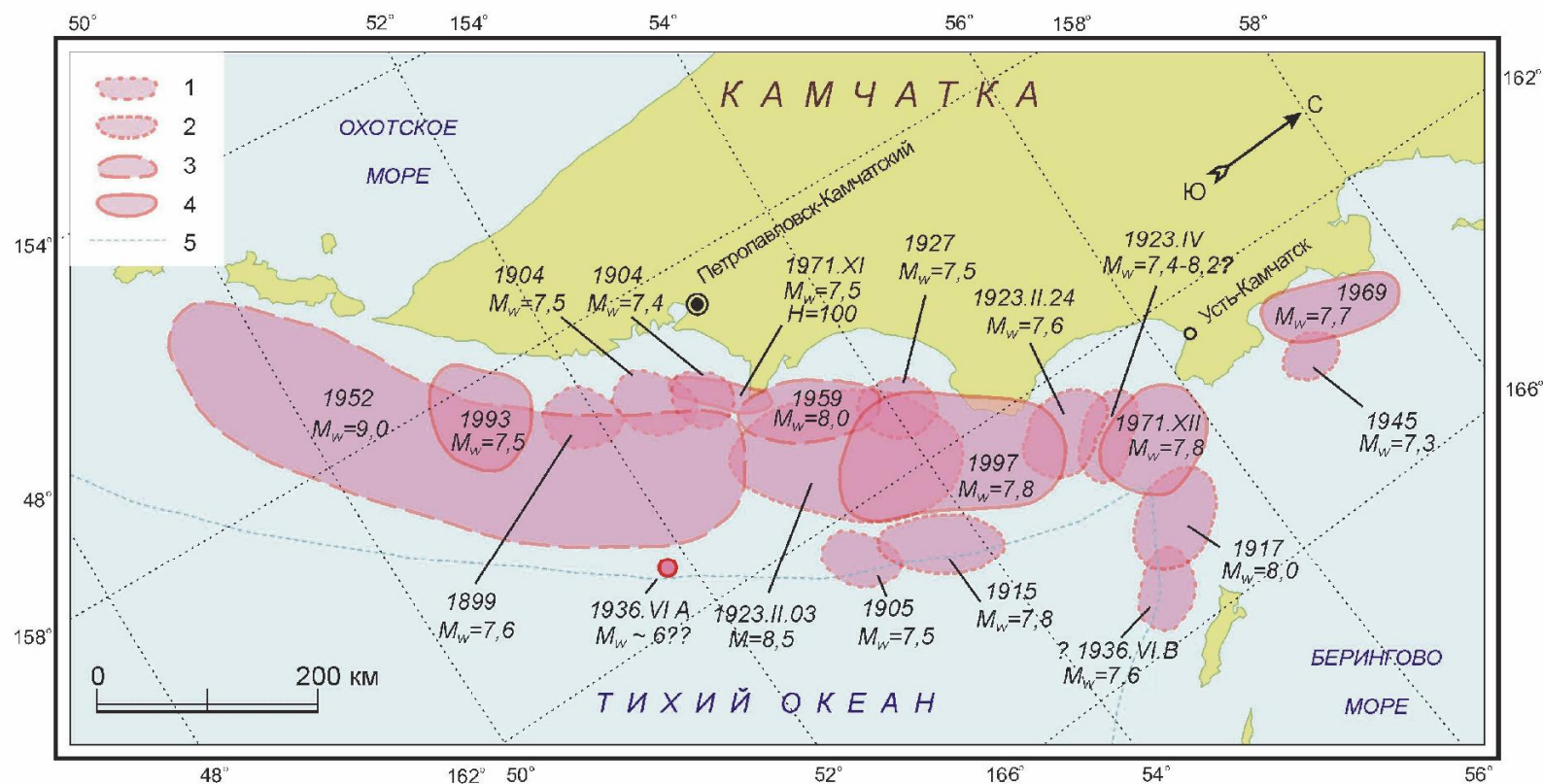
Геодинамическая природа землетрясения 20.04.2006 в Корякии



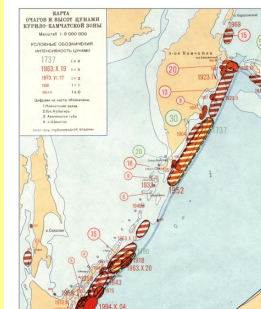
20.04.2006 M=7.6

Повтор – историческая сейсмичность

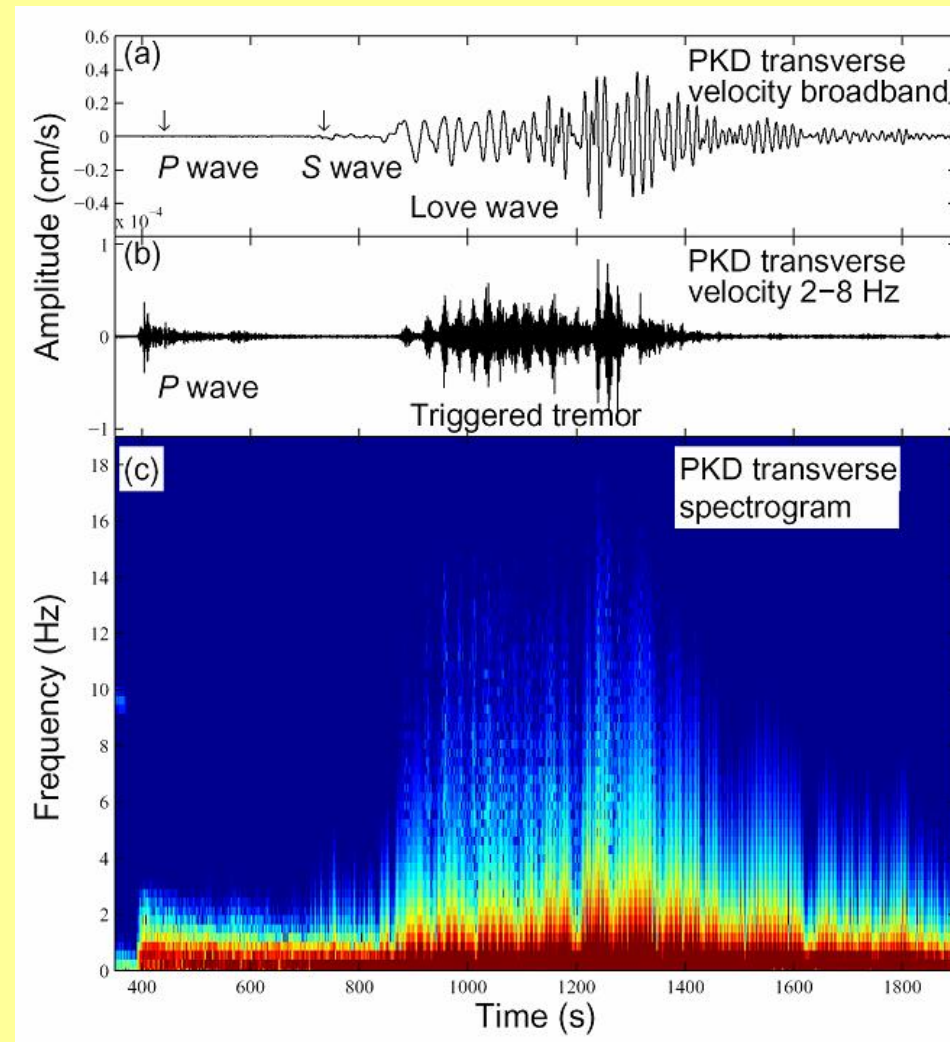
Схема расположения очагов сильнейших землетрясений Камчатки с 1899 г.



Контуры очагов: 1- возможные, 2 - ориентировочные, 3- менее надежные, 4 - относительно надежные, 5 - осевая линия глубоководных желобов.



Менее быстрые движения в Земле: дрожание, «тихие землетрясения», крип



Предваряющее, косейсмическое и постсейсмическое движение в очаге камчатского землетрясения 05.12.1997 (M=7.9) по GPS наблюдениям

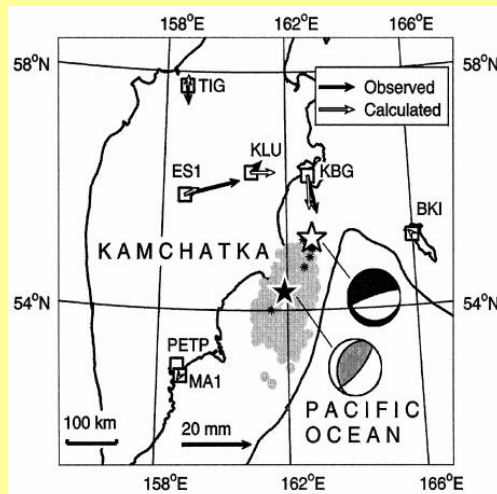
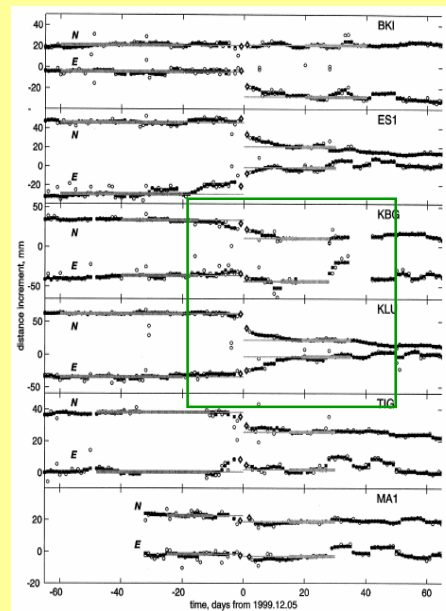
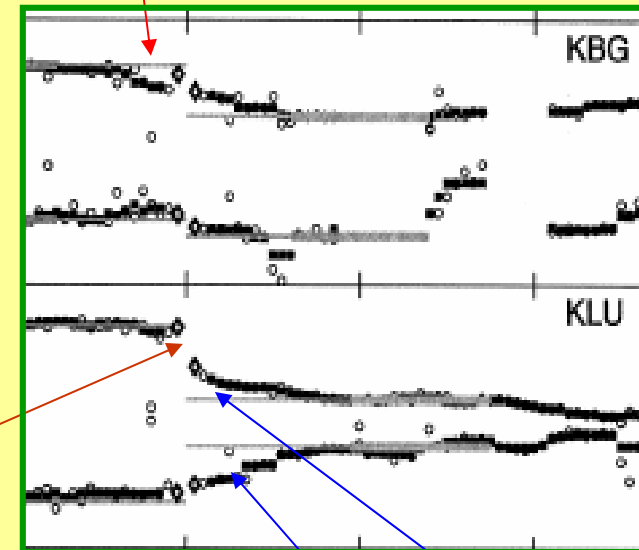


Figure 4. Pre-seismic motions before Kronotskoye earthquake with



предвестник



косейсмический
скачок

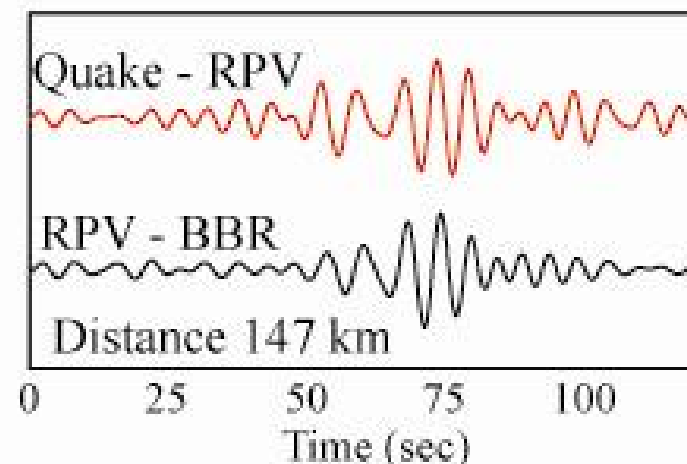
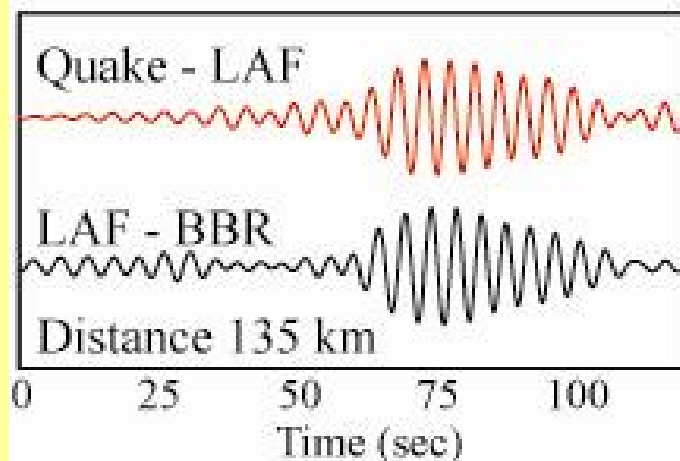
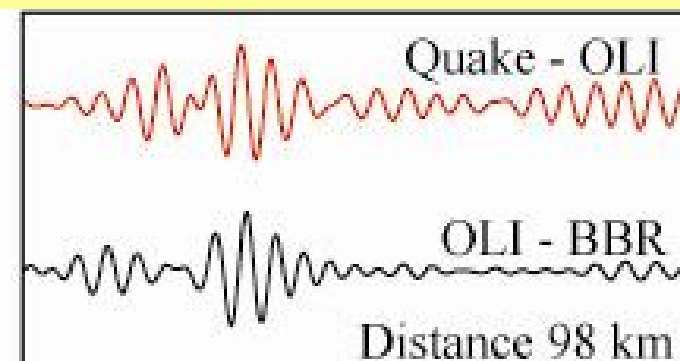
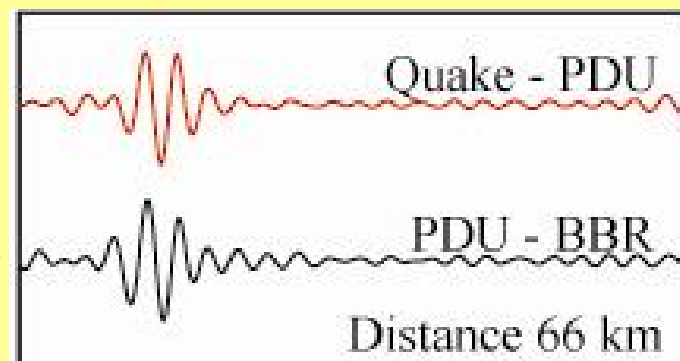
афтерслип

40 суток

Корреляционный анализ непрерывных фоновых колебаний
(сейсмического шума) для изучения строения Земли и временных
вариаций свойств литосферы

землетрясение

корреллограмма
шума



Инженерная Сейсмология

Цель: снабдить

- инженеров: информацией для проектирования сейсмостойких зданий и сооружений («расчетные сейсмические нагрузки»)
 - градостроителей и планировщиков: информацией для обоснования территориального размещения застройки, сооружений и пр.
-

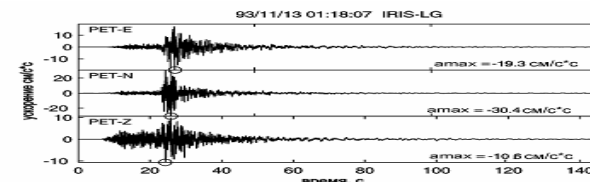
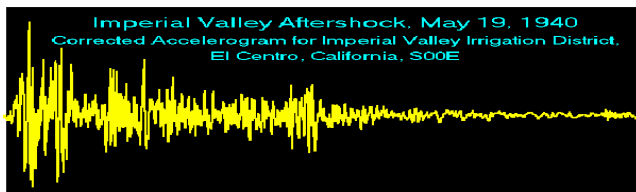
(1) Эмпирическое и полуэмпирическое описание сейсмических воздействий.

- свойства движений грунта (баллы, ускорения, скорости, смещения, деформации, длительности колебаний, подвижки по разломам)
- частота/повторяемость значений параметров
- спектральные характеристики

(2) Физически обоснованное моделирование движений грунта

- Конец части 1

Часть 2. Прикладная сейсмология



Детализация требований инженеров

Уровень «массовый»: дать параметр расчетного движения грунта под зданием - эквивалентное инерционное ускорение.

Инженеры делают все сами, ведут расчет на эквивалентную статическую силу, а у сейсмологов берут:

значение балла 12 балльной шкалы интенсивности (РФ),
либо пиковое ускорение движения грунта (Европа),

Уровень «особый»: дать расчетную модель воздействия на здание в виде ускорения как функции времени (акселерограмма),

Инженеры ведут расчет используя численную модель здания, пока обычно по линейной схеме, без учета повреждений и частичных разрушений

Сложная и интересная задача для сейсмолога.

Общий принцип выбора расчетного воздействия:
оно должно быть **РЕДКИМ**: **1 раз за T лет или реже**

<i>объекты</i>	<i>повторяемость</i>
рядовые/массовые здания:	1/500 лет
школы больницы и т.п.	1/1000 лет
особые здания, мосты и т.п.	1/5000 лет
АЭС	1/10000 лет

Термины:

сейсмическая опасность (*hazard*): частота превышения заданного порогового значения параметра воздействия для средних или скальных грунтов, или для конкретной площадки. *Научное понятие.*

общее сейсмическое районирование (*zoning*): задает нормативное расчетное воздействие для целей проектирования. Обычно – обратная функция сейсмической опасности: величина воздействия с фиксированной частотой превышения. *Административно-юридическое понятие.*

сейсмическое микрорайонирование: выполняет пересчет известного воздействия для скального грунта в ожидаемое воздействие для фактического грунта.

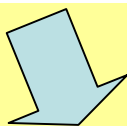
Вероятностный расчет (анализ) сейсмической опасности

***Модель сейсмичности
(принята стационарной)***

**где и с какой частотой
возникают очаги
разных магнитуд; предельные
магнитуды**

**БАЗА: Каталоги произошедших
землетрясений.**

**Расположение и параметры
геологических разломов.
Скорости относительных
движений плит**



***Расчет частоты сотрясений
разной силы для каждой
географической точки
(карта сейсмической
опасности)***

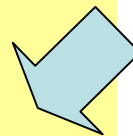
Модель

воздействия:

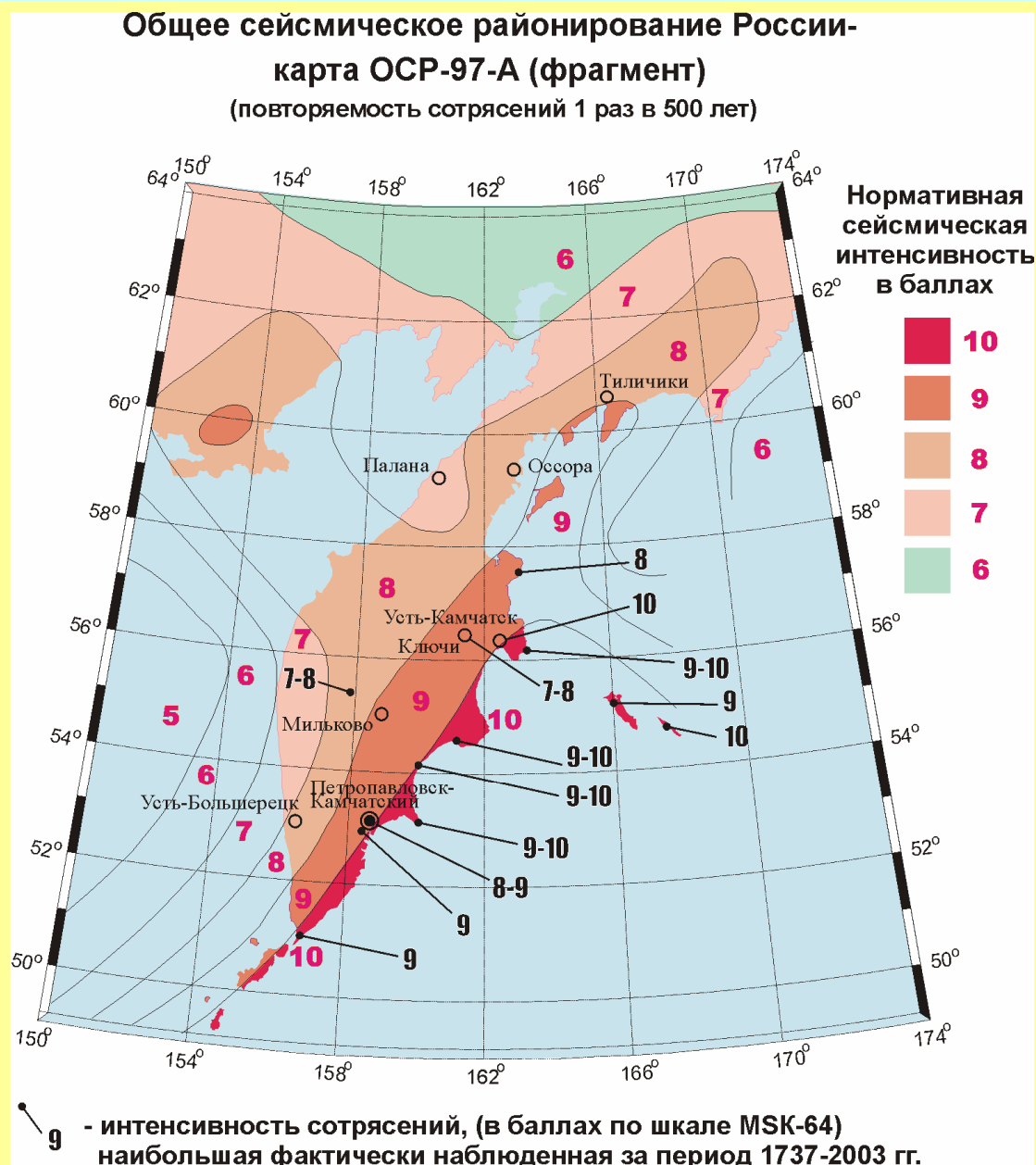
**каковы параметры
колебаний грунта вокруг
очага определенной
магнитуды; каков типичный
разброс параметров**

**БАЗА: Местные записи сильных
движений вблизи очага (редкие);
записи слабых землетрясений
(побольше);**

**записи сильных движений
других регионов - как аналоги.
Свойства и модели очагов.
Модели затухания**



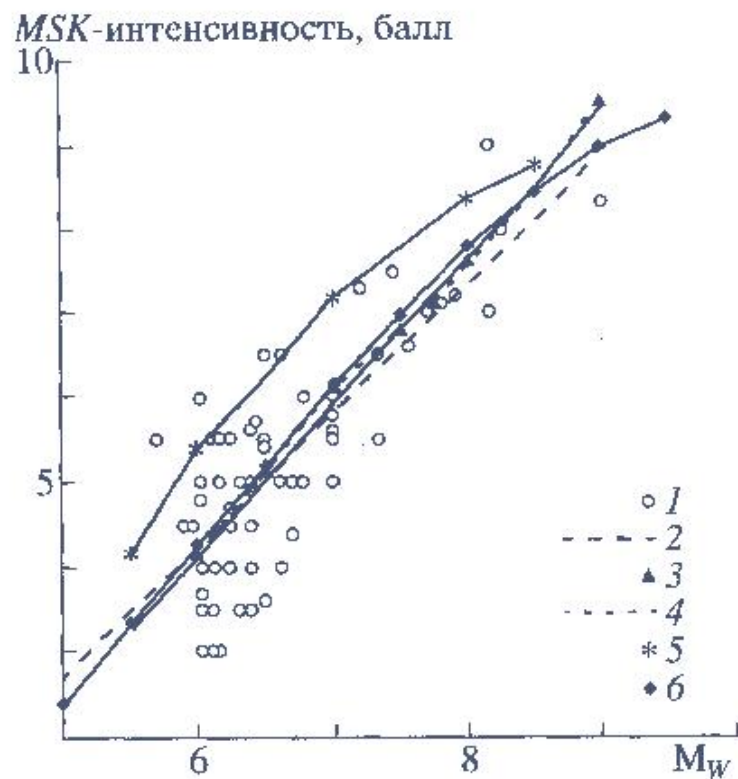
Пример карты ОСР для региона Камчатки



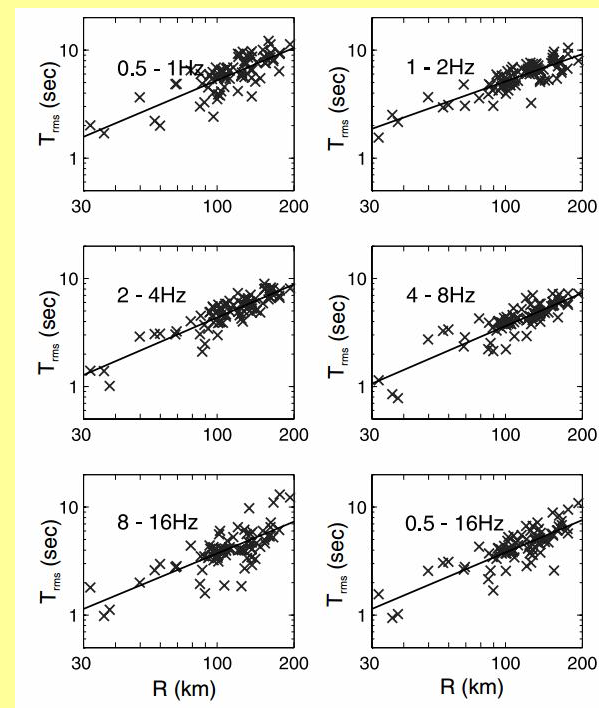
Исходные данные для расчета сейсмической опасности

Уровни амплитуд: балл = $f(M)$

[при $r=100$ км]



Длительность= $f(\text{расстояние})$ –
малые M



Зависимость уровня амплитудного спектра Фурье землетрясений Камчатки от магнитуды

Пример

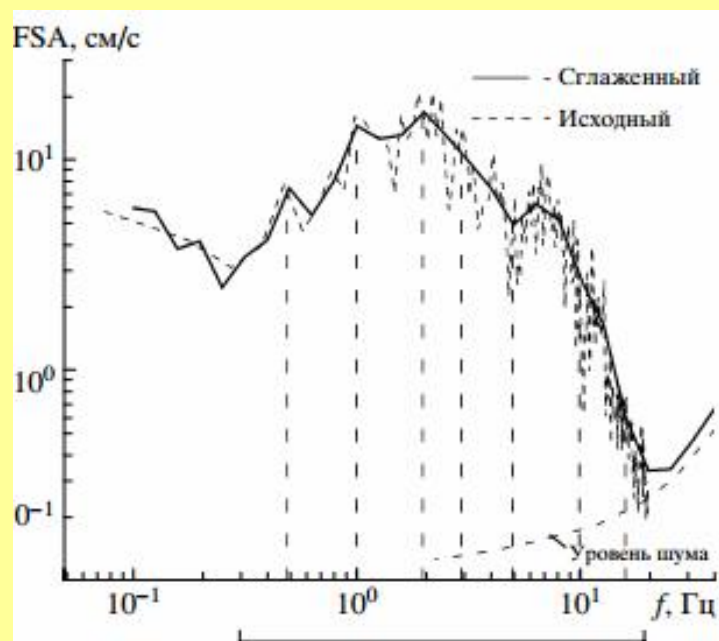
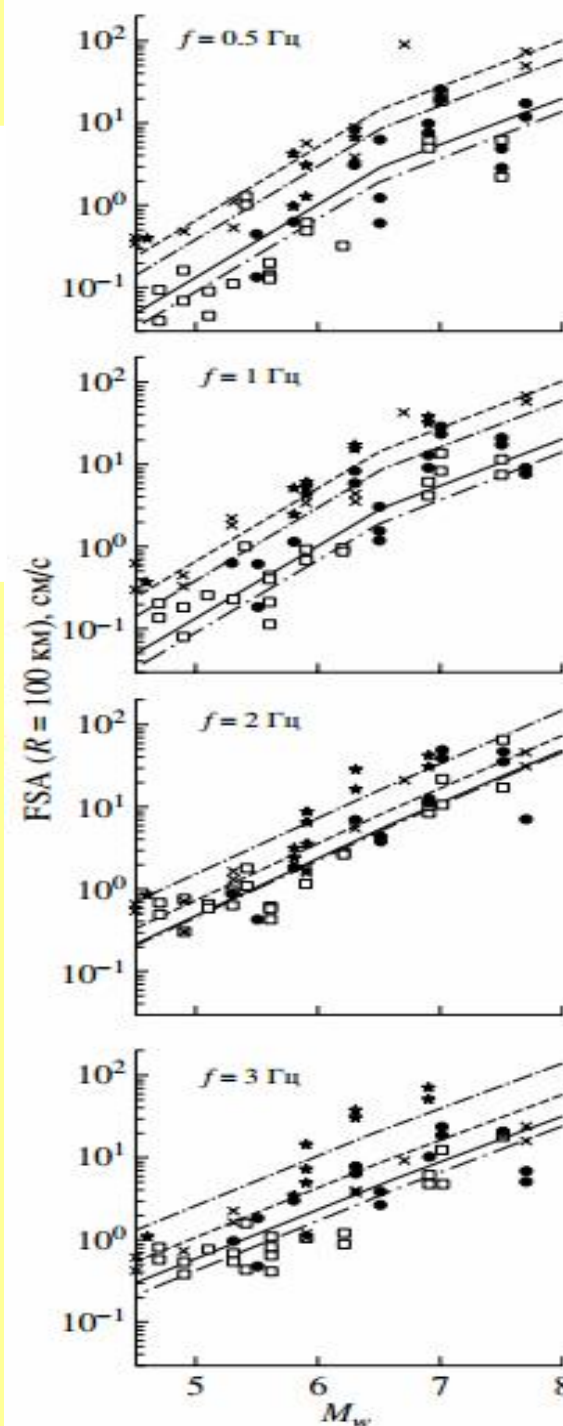


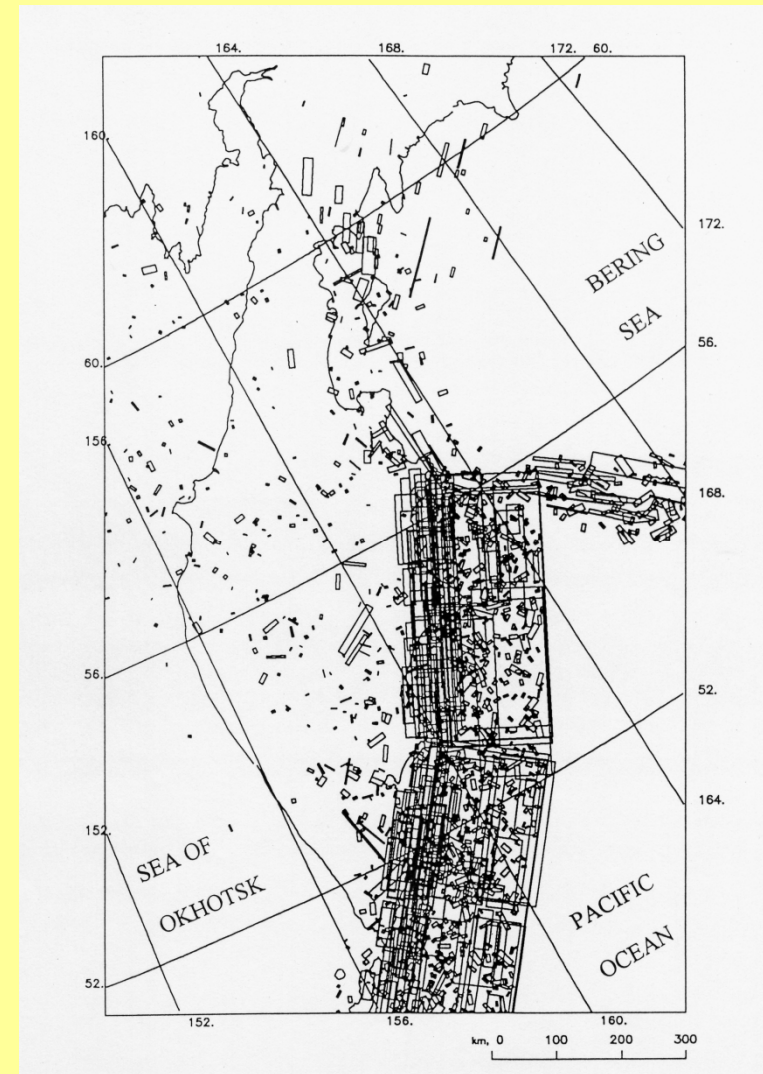
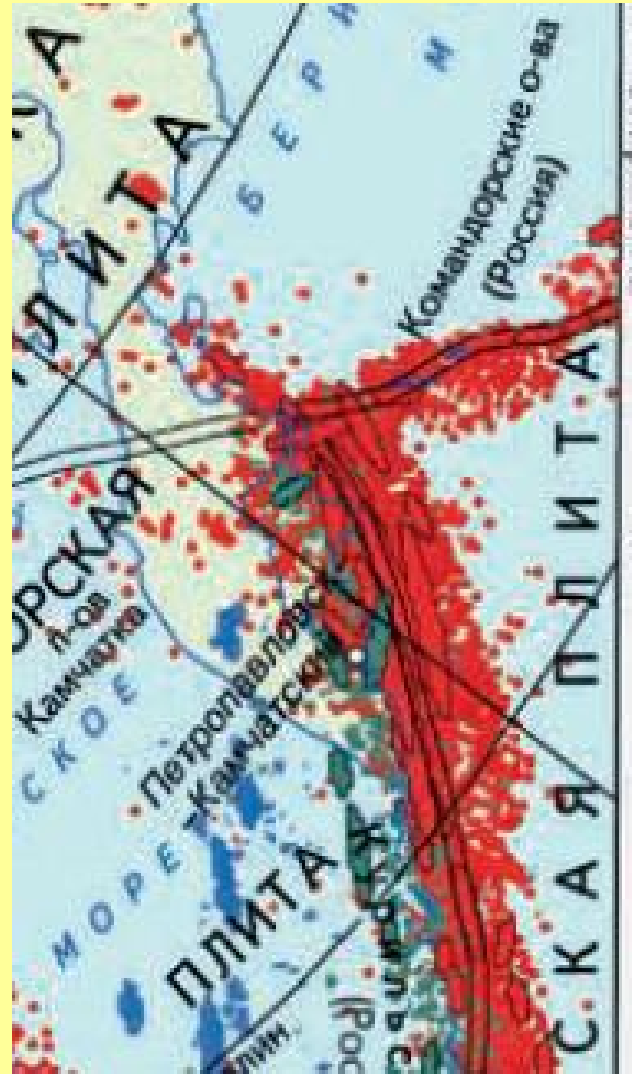
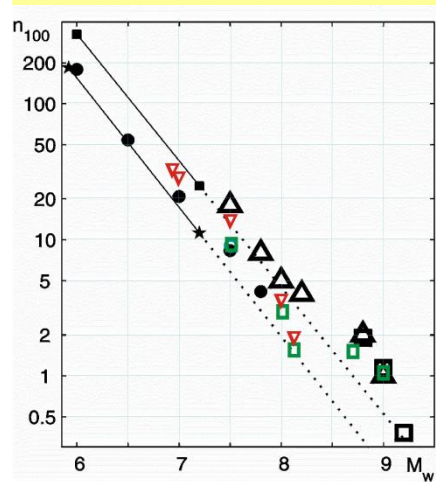
Рис. 3. Пример расчета спектра Фурье. Землетрясение 2 марта 1992 г., записанное на ст. Жупаново (GPN). Чертой снизу обозначен диапазон частот, в котором надежно определяется спектр Фурье.

Средние
зависимости
FS(M)

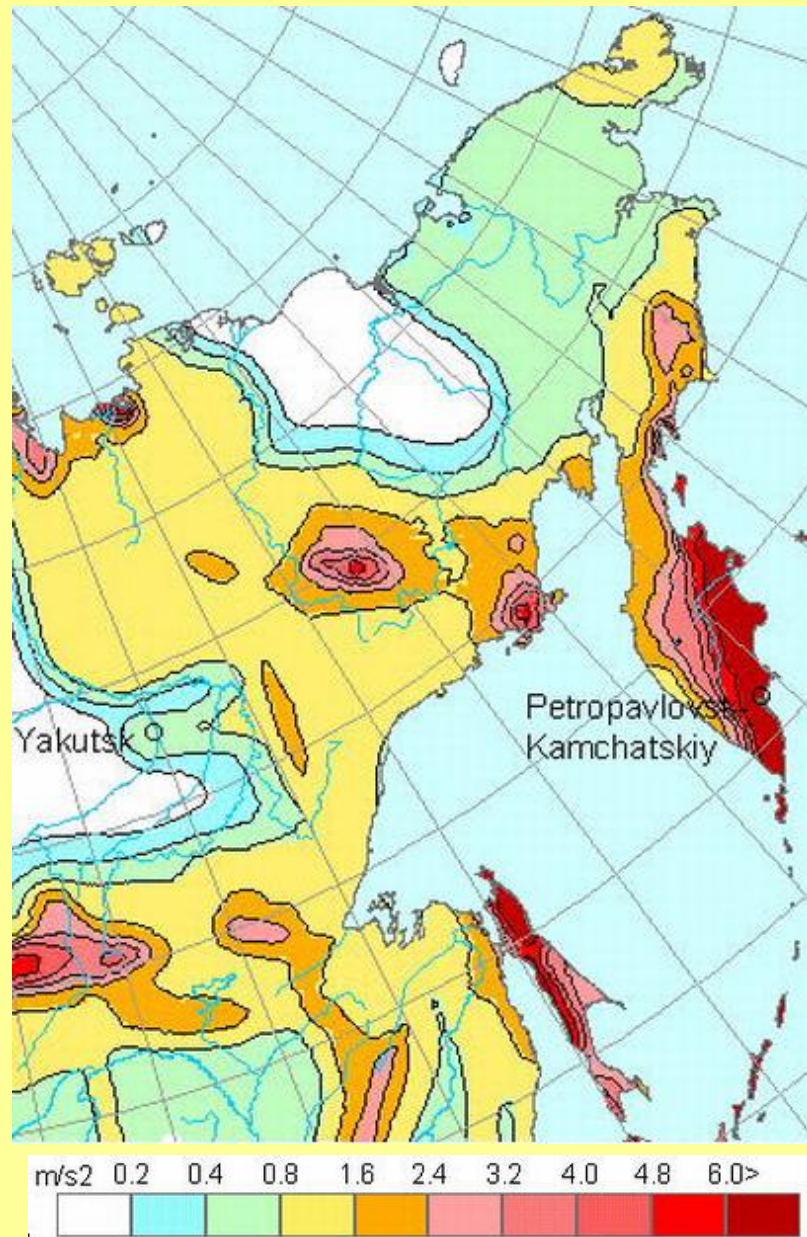
Для
расстояния
100 км от
очага



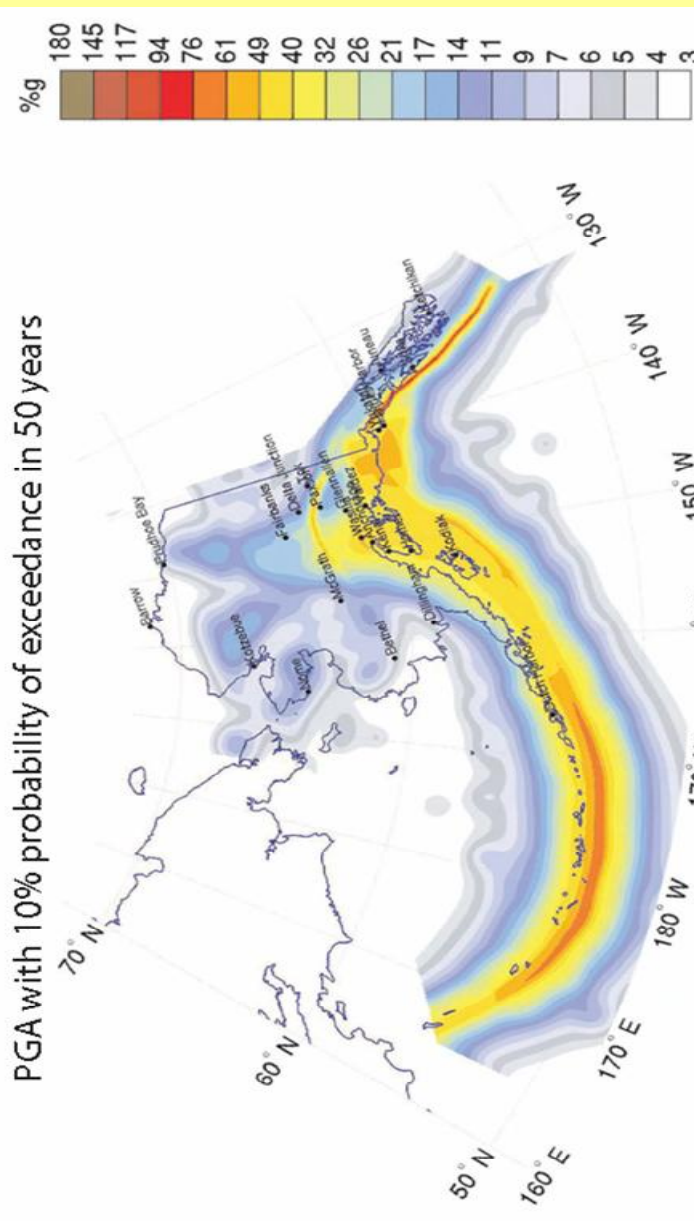
Сейсмичность при счете карт опасности: модельная и фактическая



Карты ОСР



PGA with 10% probability of exceedance in 50 years



Alaska is seismically active, but the risk of earthquake damage varies widely. The map shows peak ground acceleration from an earthquake is expected to be stronger along Alaska's Pacific coast than at more northern latitudes. Source: U.S. Geological Survey

СМР

эффекты грунтов

а. линейные (слоистая и
низкомодульная среда)

б. вязкоупругость
(линейные потери)

в. начальные стадии
разрушения грунта
(нелинейная сплошная
среда)

г. разжижение грунта

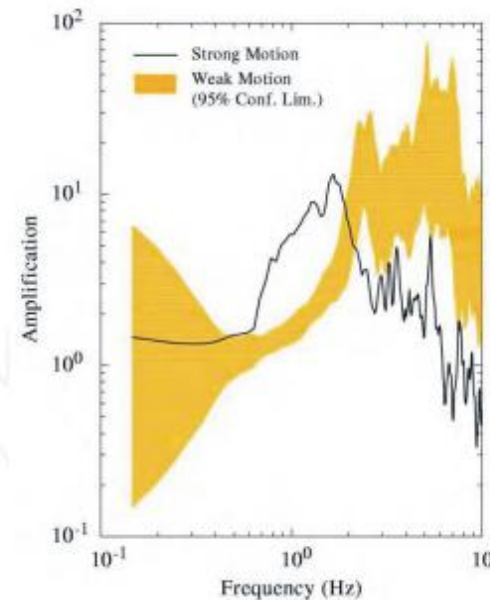
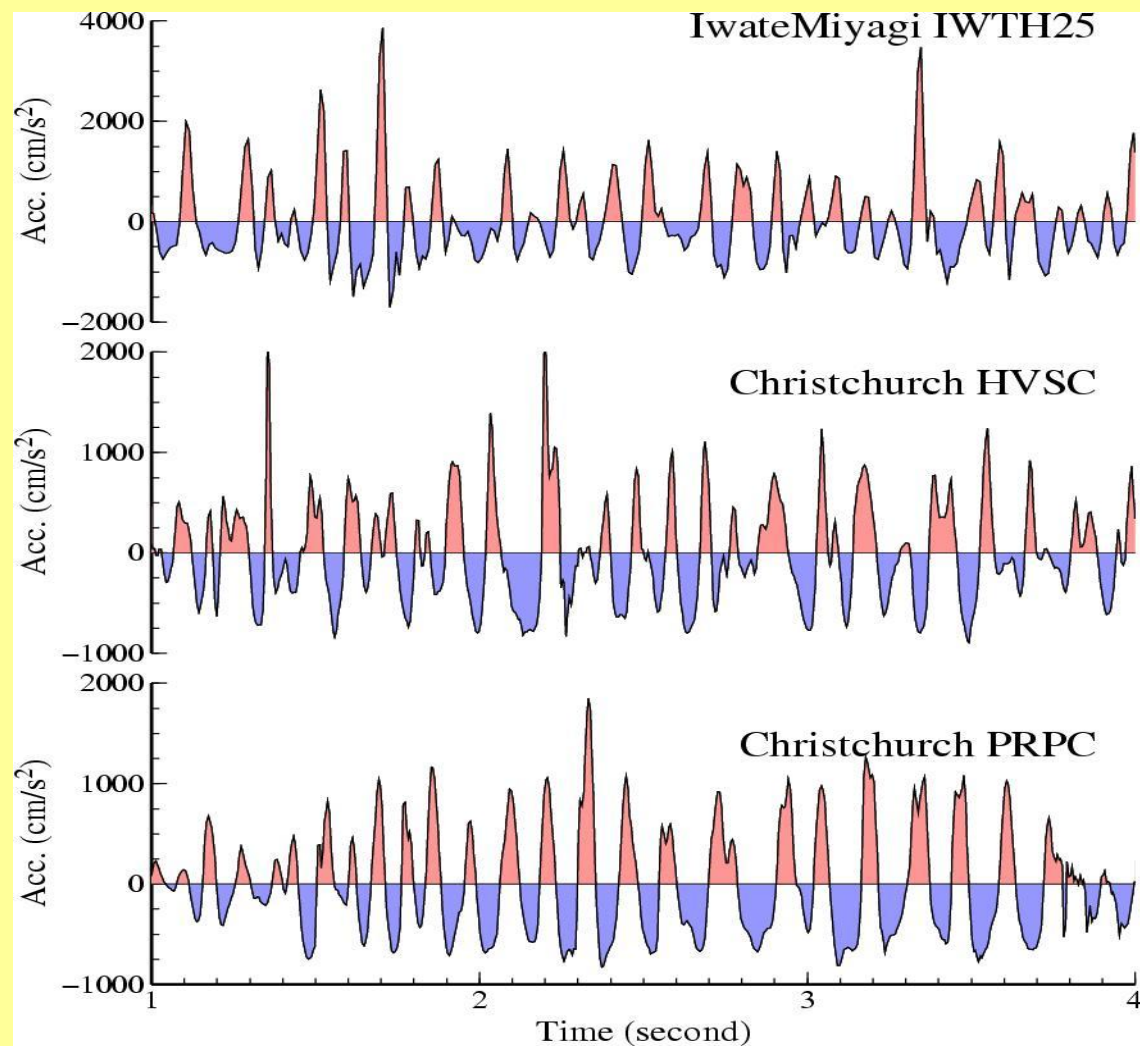


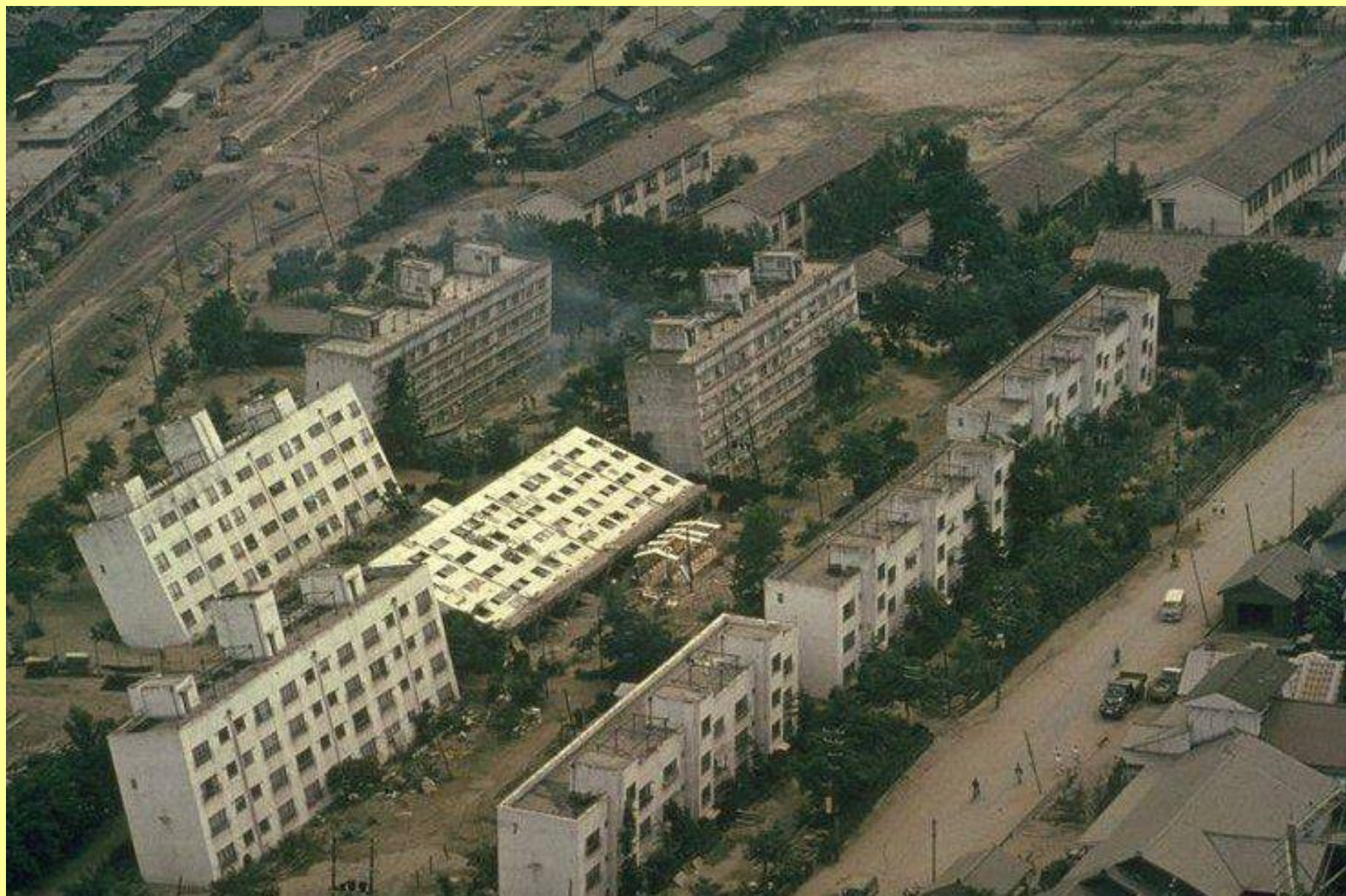
Fig. 4.2. Borehole transfer functions computed at KiK-net station TTRH02 in Japan. The orange shaded area represents the 95% confident limits of the transfer function using weak-motion events ($\text{PGA} < 10\text{cm/s}^2$). The solid line is the transfer function computed using the October 2000 Tottori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

желтое: АЧХ грунтовой толщи при малых амплитудах

черное: эквивалентная АЧХ грунтовой толщи при амплитудах ускорения около 1 g

Частичный отрыв слоя грунта при сильнейших колебаниях (более 1 g)





Основы физического моделирования движения грунта : схема формирования сигнала

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

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

$A(t)$ временная функция
очага по ускорению

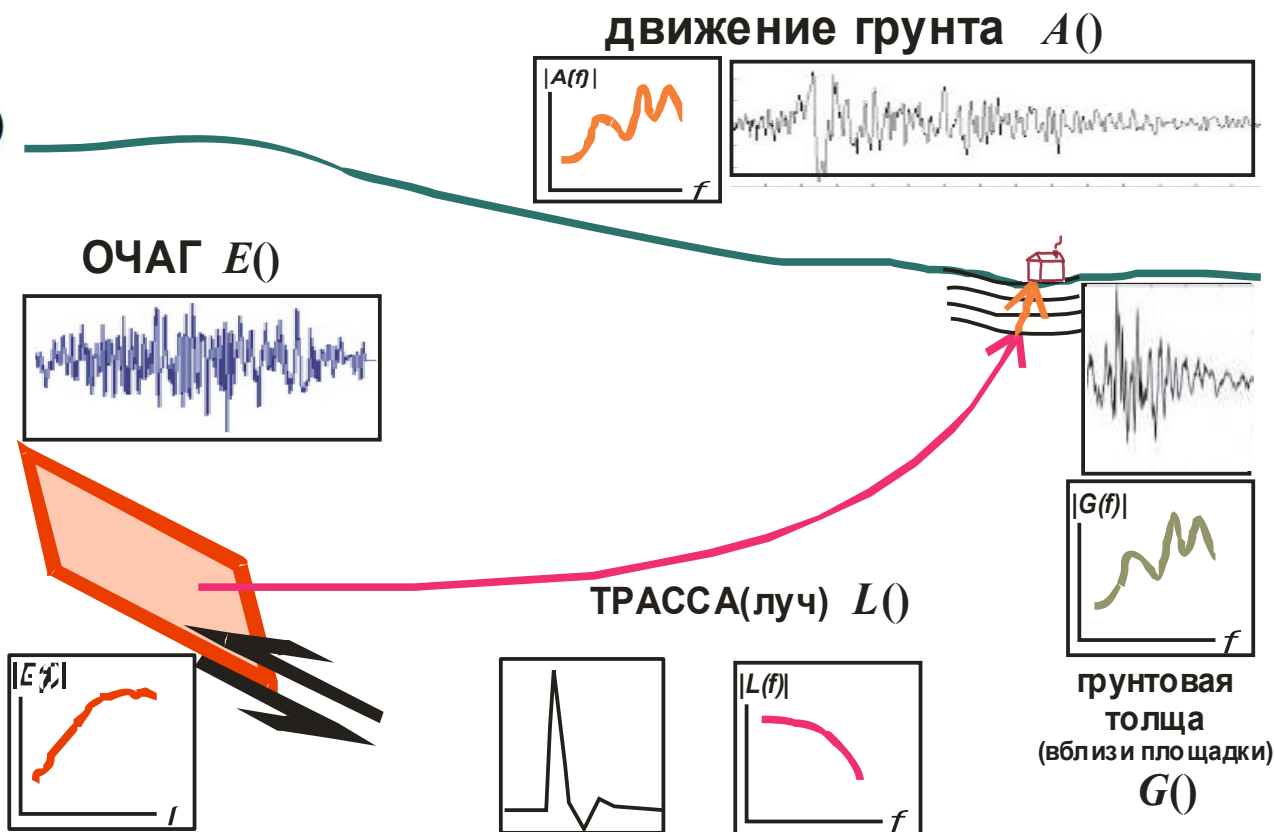
$A(f)$ ее преобразование Фурье
(комплексный спектр)

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

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

$G(t)$ импульсная реакция
грунтовой толщи

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



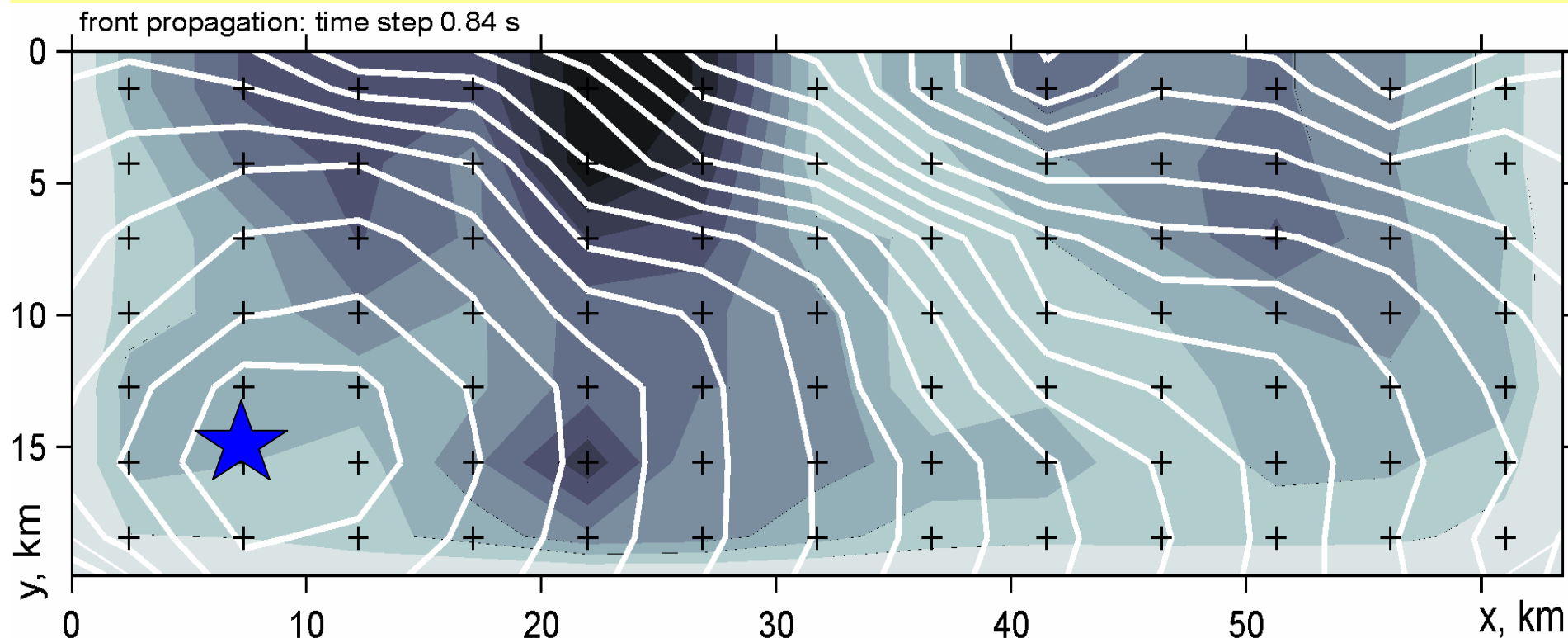
Пример моделирования финальной подвижки в очаге

Градации серого: амплитуда подвижки = мощность субисточника

Белые контуры: последовательные положения фронта разрыва

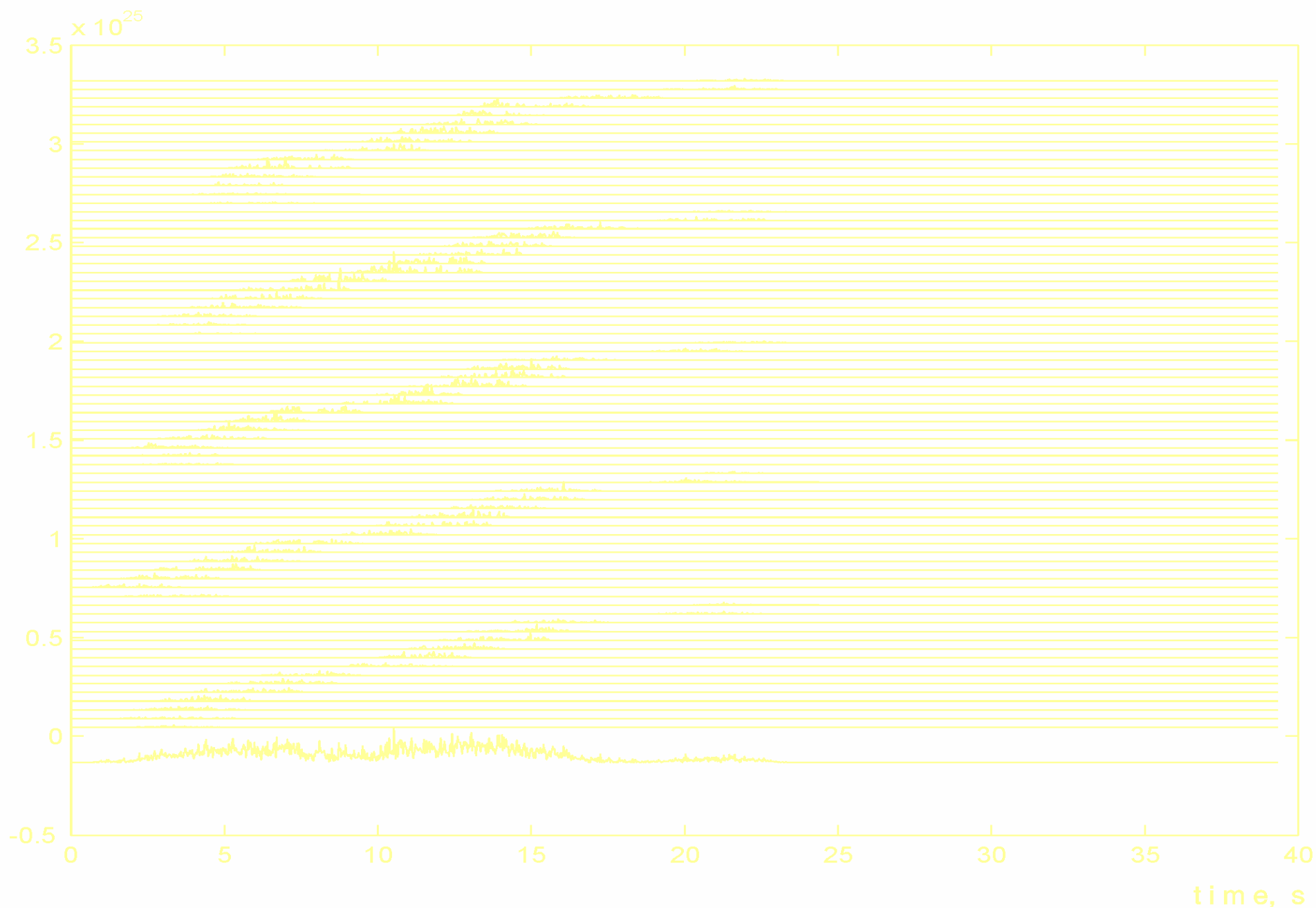
★ гипоцентр

+ субисточник



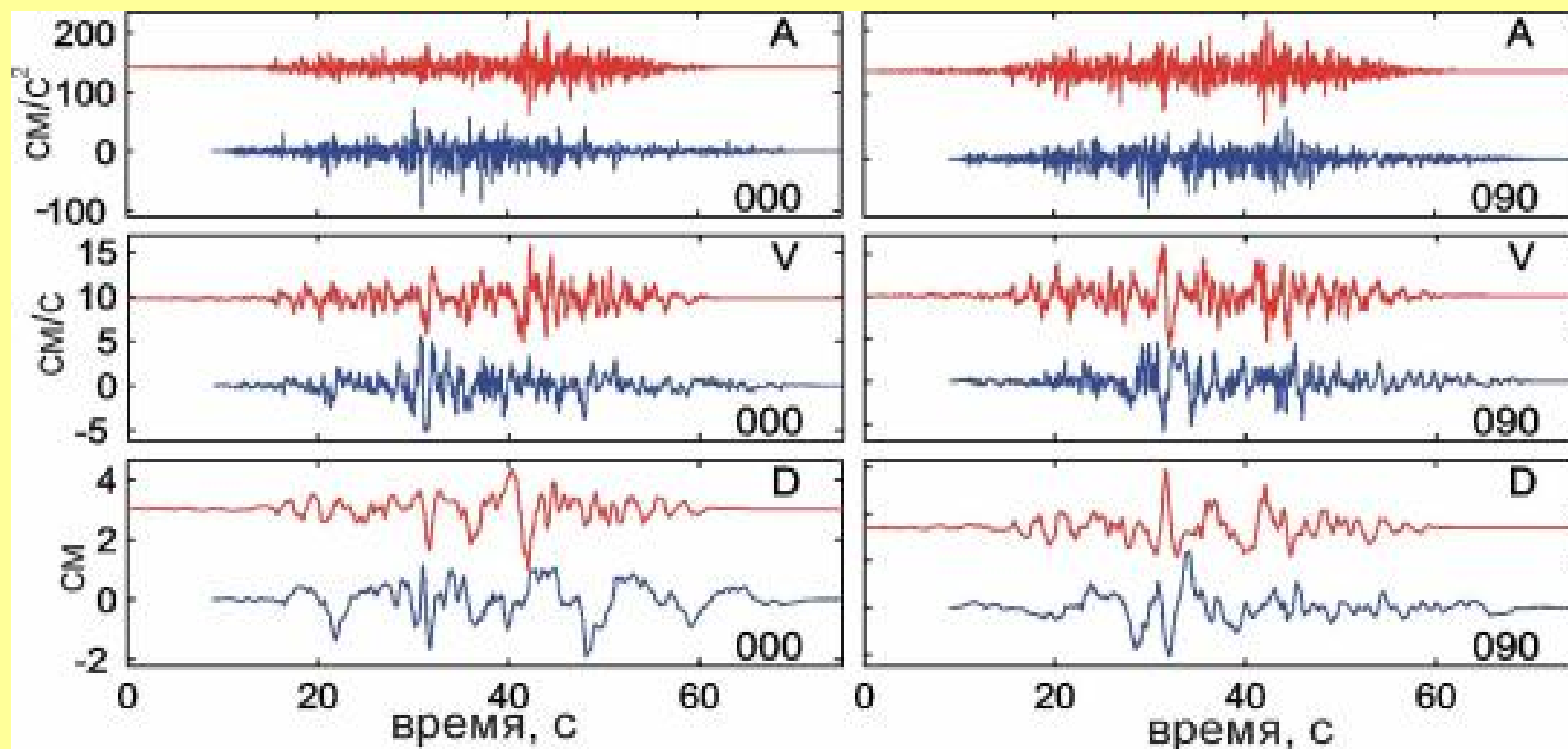
$M_w=7.2$, $L = 63$ km, $W=20$ km. Сетка субисточников 13×7 .
[ось y - по падению; ось x – по простиранию]

Временной ход 75 субисточников («белый шум», будет окрашен) (для модельного очага с сеткой субисточников 15x5)



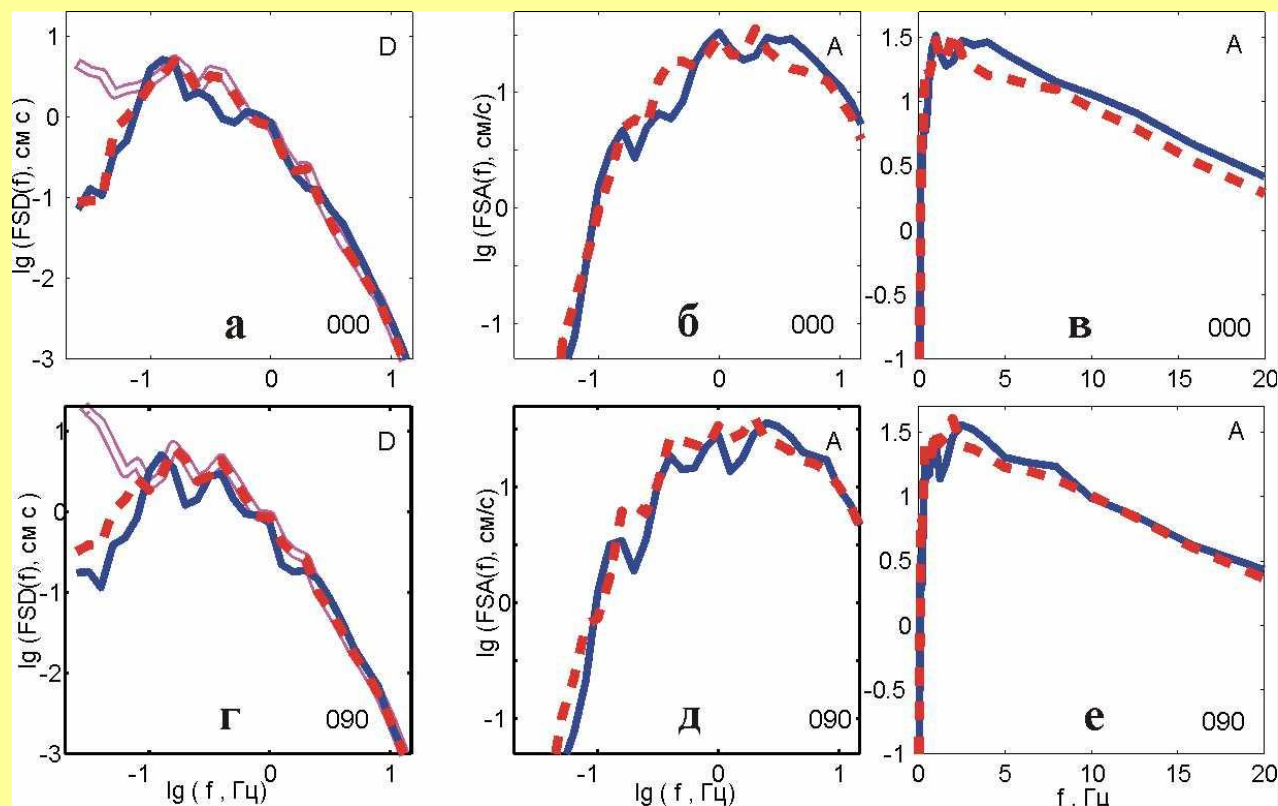
Проверка подхода: сравнение **модельного** и **фактического** движения грунта
на примере реальной записи:

1971.11.24 M=7.7 I=7 баллов в Петропавловске-Камчатском
запись ст РЕТ



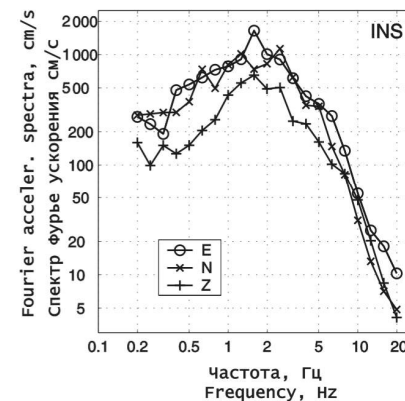
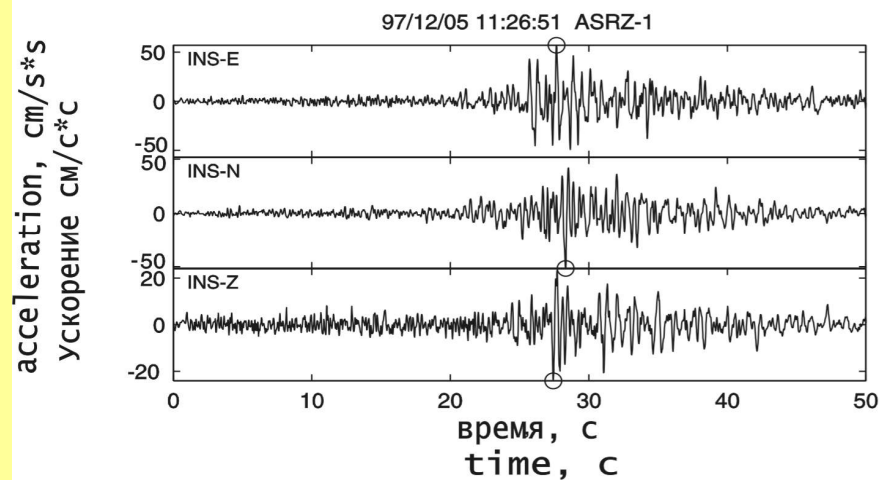
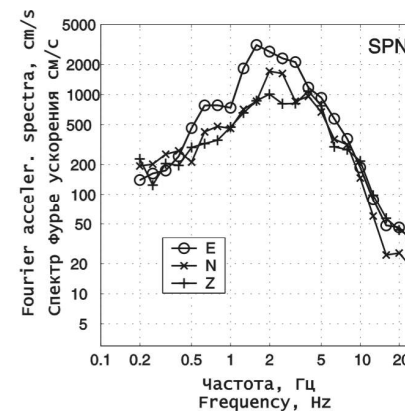
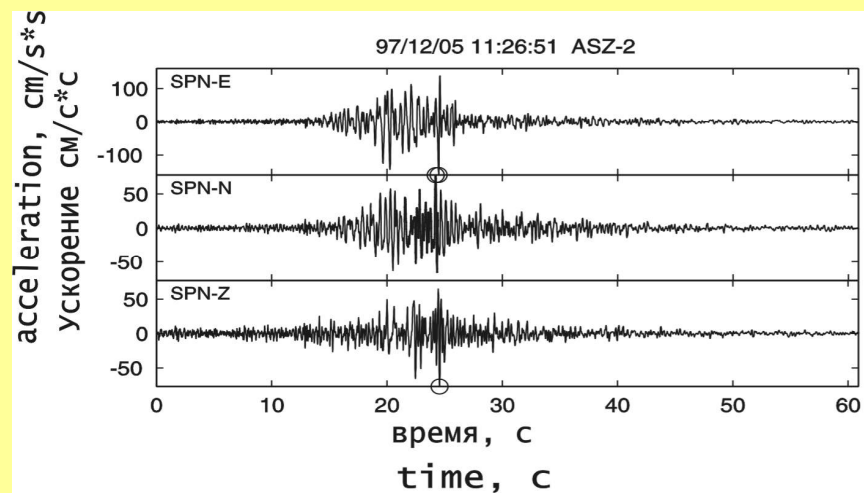
Задача подгонки деталей движения грунта не ставилась и не решалась
Амплитуды, длительности и общий качественный характер движения
подогнаны успешно

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

Примеры записей сильных (M=7.8) землетрясений (ждут чтобы их промоделировали)

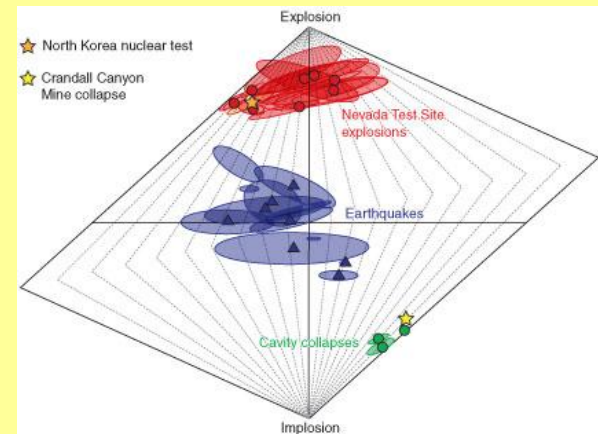
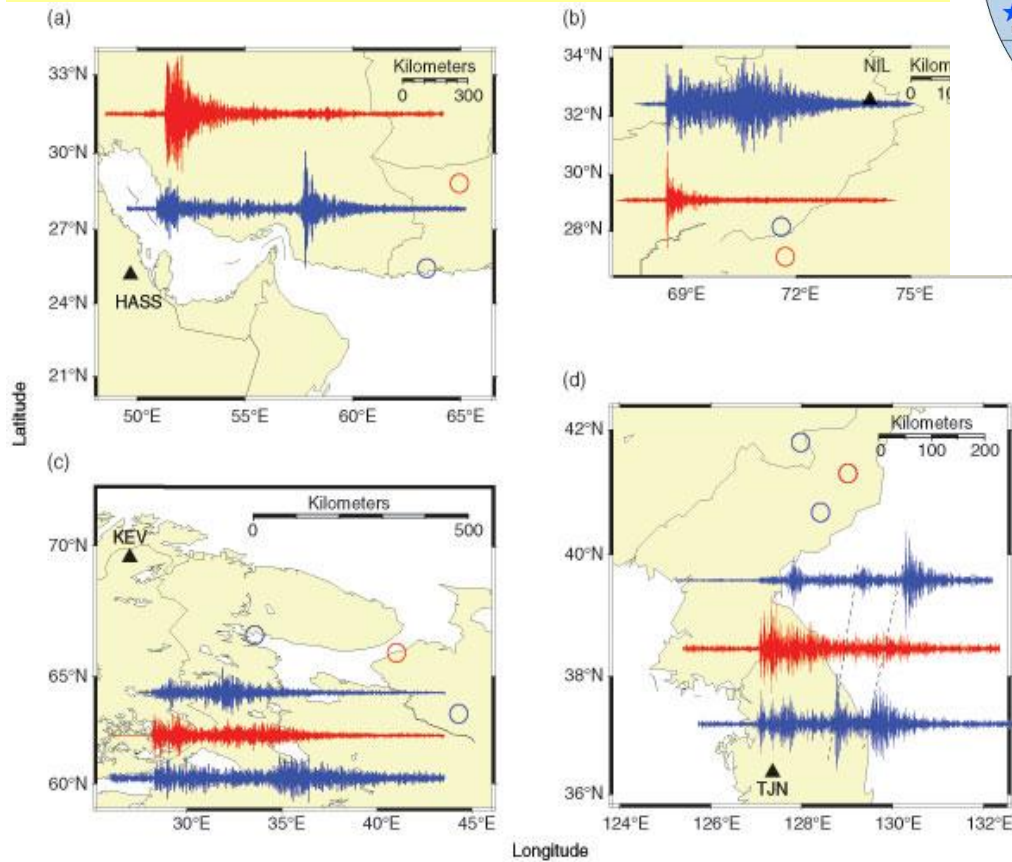
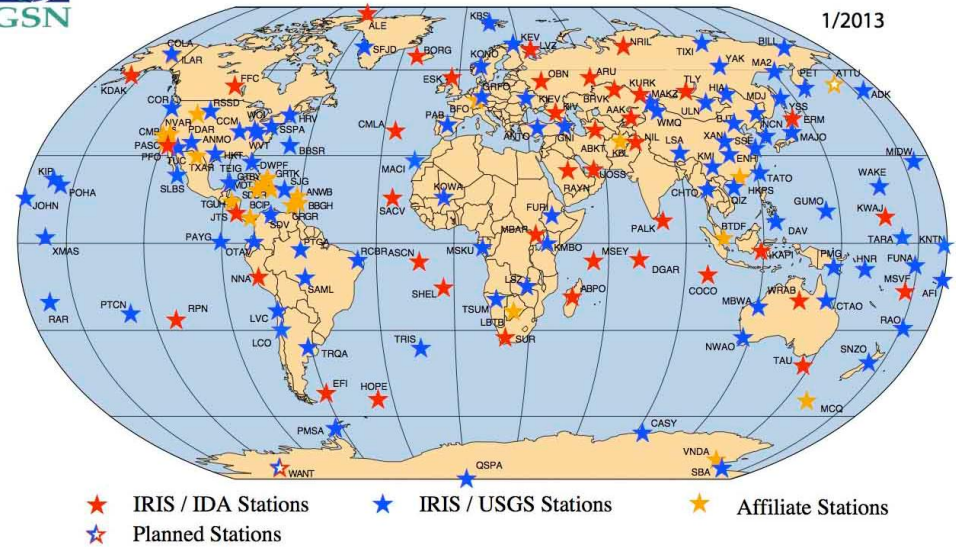


Сейсмология в обнаружении, идентификации и оценке силы ядерных взрывов



GLOBAL SEISMOGRAPHIC NETWORK

1/2013



ТОЧКИ РОСТА

Томография (3D сейсмика)

Томография во времени (4D сейсмика), мониторинг литосферы: вулканы и проч.

Использование шумового сейсмического поля для 3D и 4D реконструкций среды и мониторинга

Наведенная сейсмичность (плотины, закачка воды для нефтегазо-добычи, захоронения отходов и CO₂, для извлечения тепла Земли)

Динамика очага: физика, моделирование, реконструкции, скейлинг

Палеосейсмология и палеоцунами: реконструкция процессов на адекватных временных шкалах (не 100 а 10000 лет)

Нелинейные процессы в грунтовой толще, Земля как активная среда

Рассеяние и поглощение ВЧ волн ($f > 1$ Гц)

ТОЧКИ РОСТА 2

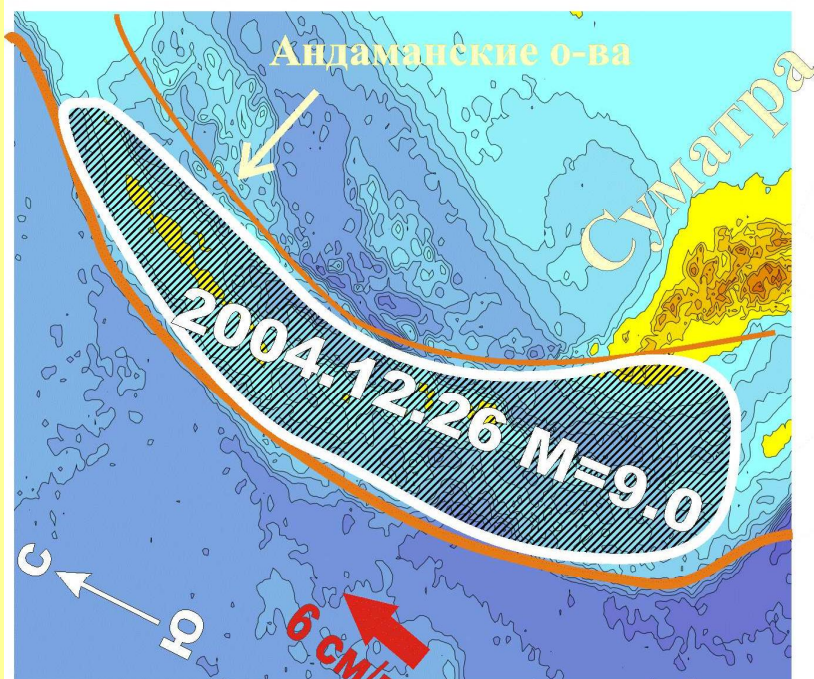
Численные методы для континуума (конечные элементы, спектральные элементы) в статике и динамике

Новые подходы и численные методы для дисконтинуума (дискретные элементы, гранулированная среда, континуум Коссера и пр.)

Теория, методы и практическое решение обратных задач для среды и для очага

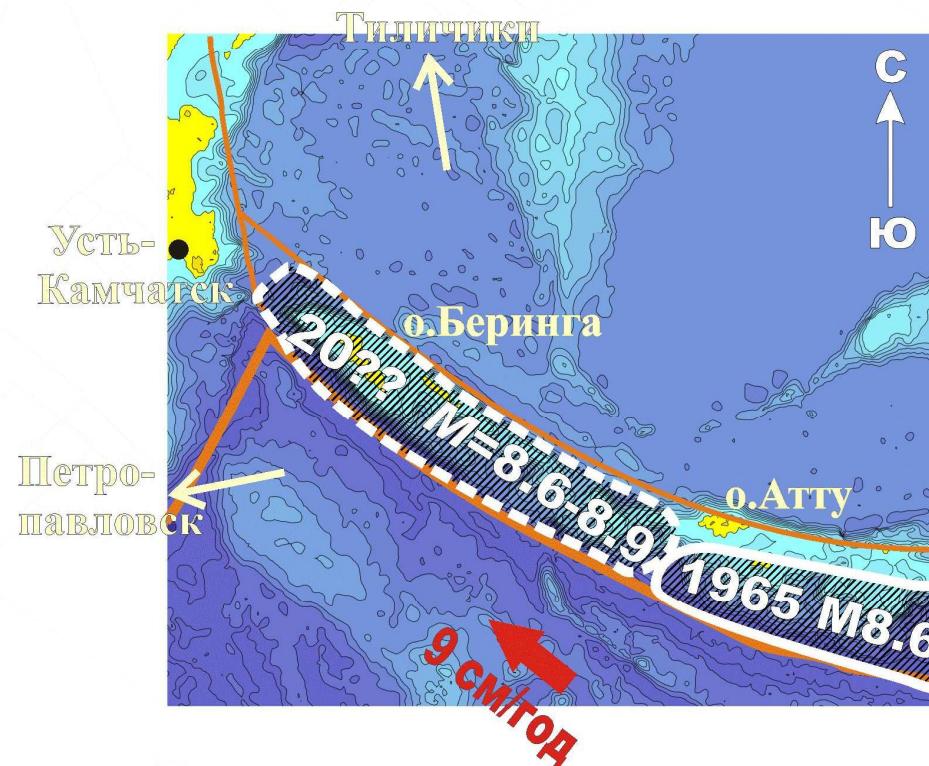
Сбор, передача, хранение больших информационных массивов (десятки и сотни терабайт), организация доступа к ним, визуализация

“Командорская брешь” - вероятная очаговая зона будущего катастрофического цунами



Границы плит и микроплит

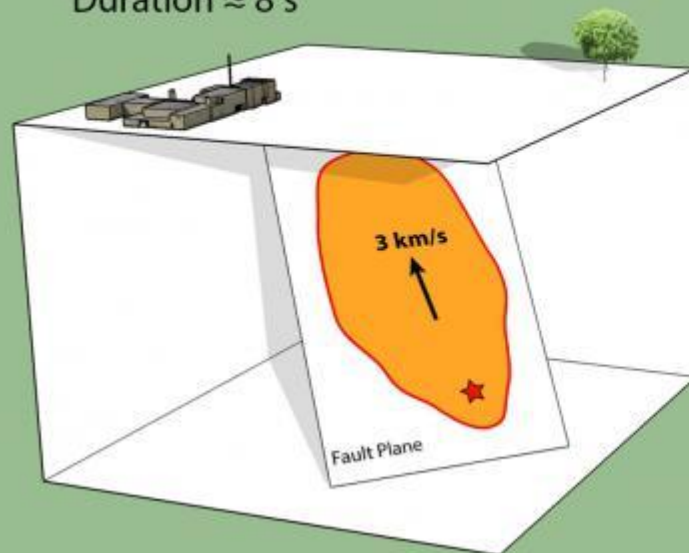
Темп накопления скольжения:	6 см/год
Последнее сильное з/т:	?? 1600-1700
Длина разрыва:	1250 км
Магнитуда:	$M_w=9.0$



Вектор скольжения

Темп накопления скольжения:	9 см/год
Последнее сильное з/т:	1858 или ранее
Длина разрыва:	до 700 км
Возможная магнитуда:	$M_w=8.6-8.9$

1994 Northridge Mw 6.7 Earthquake
Duration ≈ 8 s



2013 Sea of Okhotsk Mw 6.7 Earthquake
Duration ≈ 1.5 s

