

# Инженерная сейсмология. Опыт последних сильных землетрясений

Ольга Витальевна Павленко

Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, зав. лаб. 306 Инженерной сейсмологии

Нефтегорское землетрясение 28 мая 1995 г.

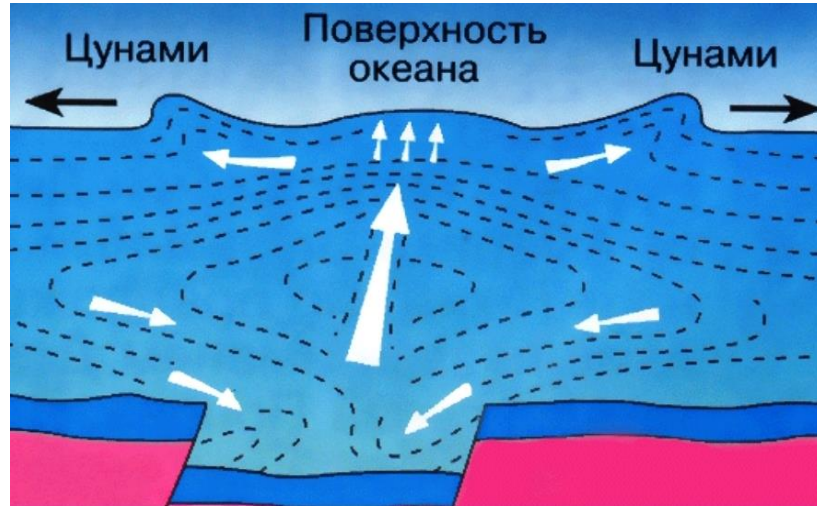
$M_w \sim 7.6$

Спитакское землетрясение 7 декабря 1988

$M_w \sim 7.0$



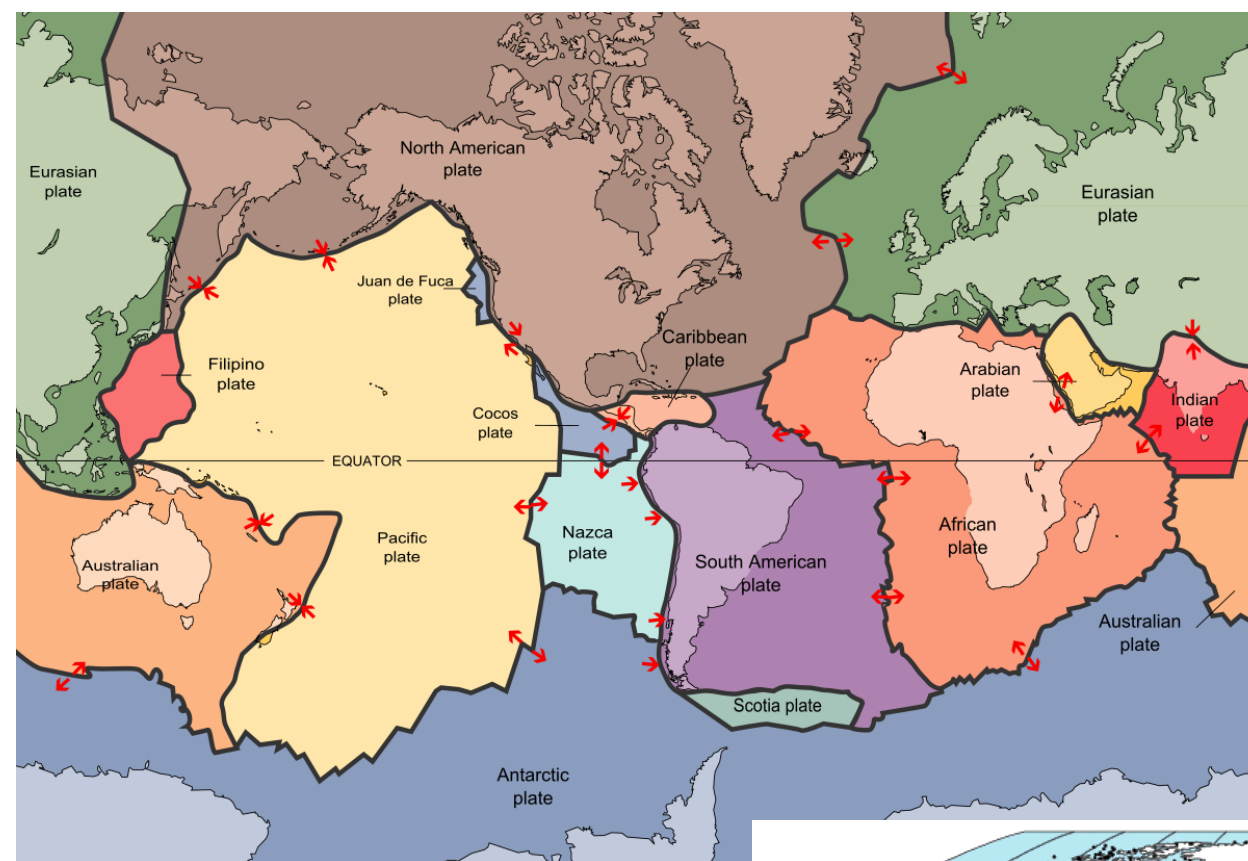
**Цунами - возникает при смещении морского дна в результате землетрясения**



**В результате цунами при Суматранском землетрясении 2004 г. погибло около 235 000 человек**

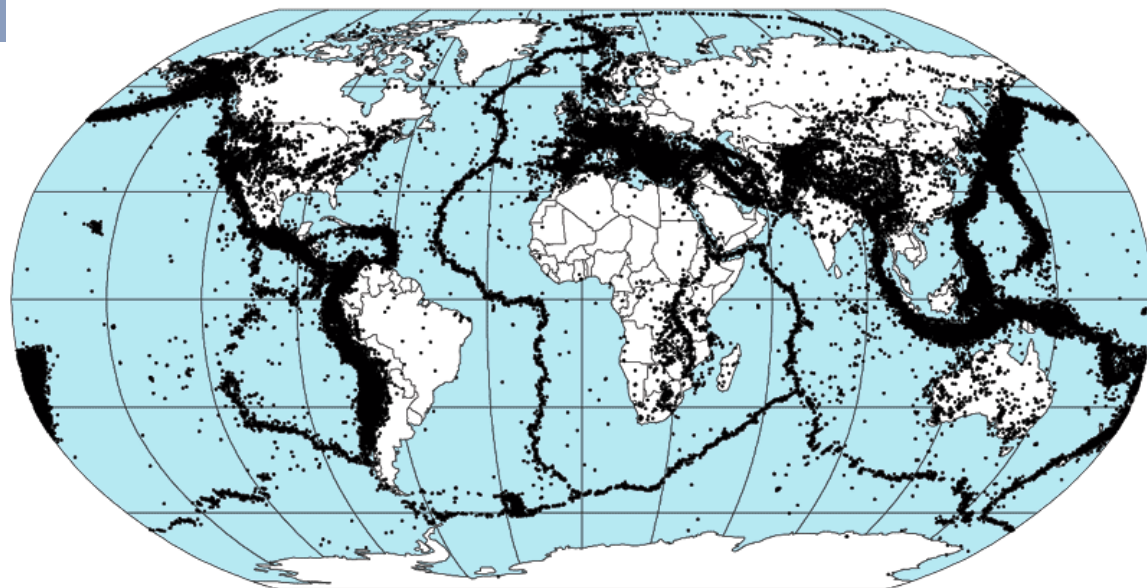


**Землетрясения вызываются  
вспарыванием, вулканической  
активностью, оползнями, горными  
ударами и пр.**



**Литосферная плита — крупный  
стабильный участок земной коры,  
часть литосферы.**

**Литосферные плиты ограничены  
зонами сейсмической, вулканической и  
тектонической активности.**





# Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1980-е годы:

## Отдел 600 Вычислительной геофизики и теории прогноза землетрясений

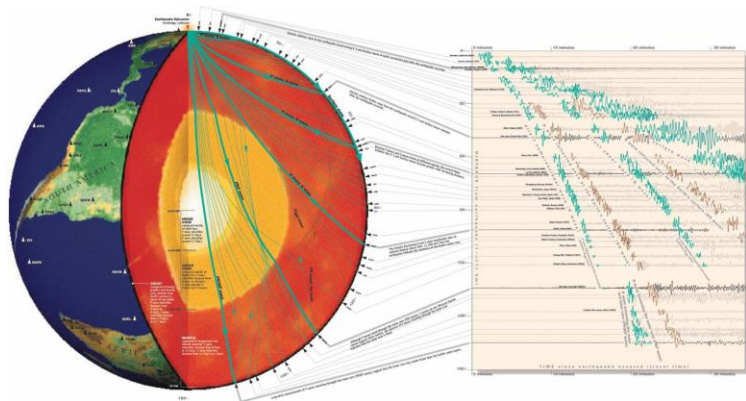
**В.И. Кейлис- Борок**



**А.В. Николаев**



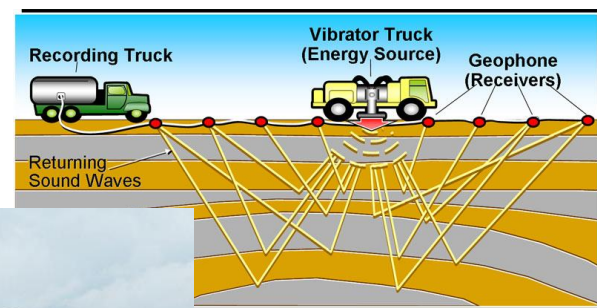
## Отдел 100 Сейсмологии

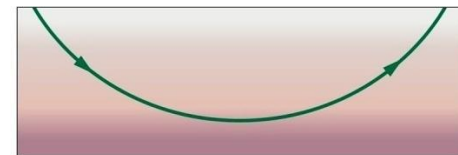
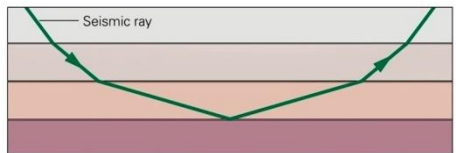
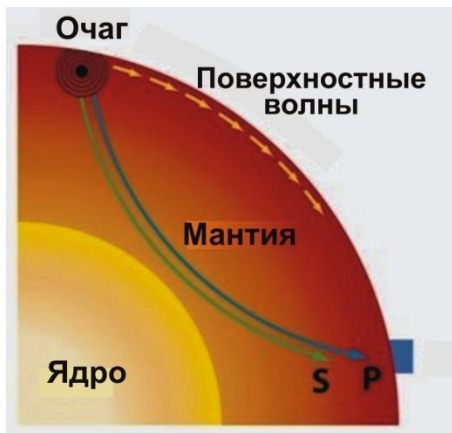


## Отдел 800 экспериментальной сейсмологии

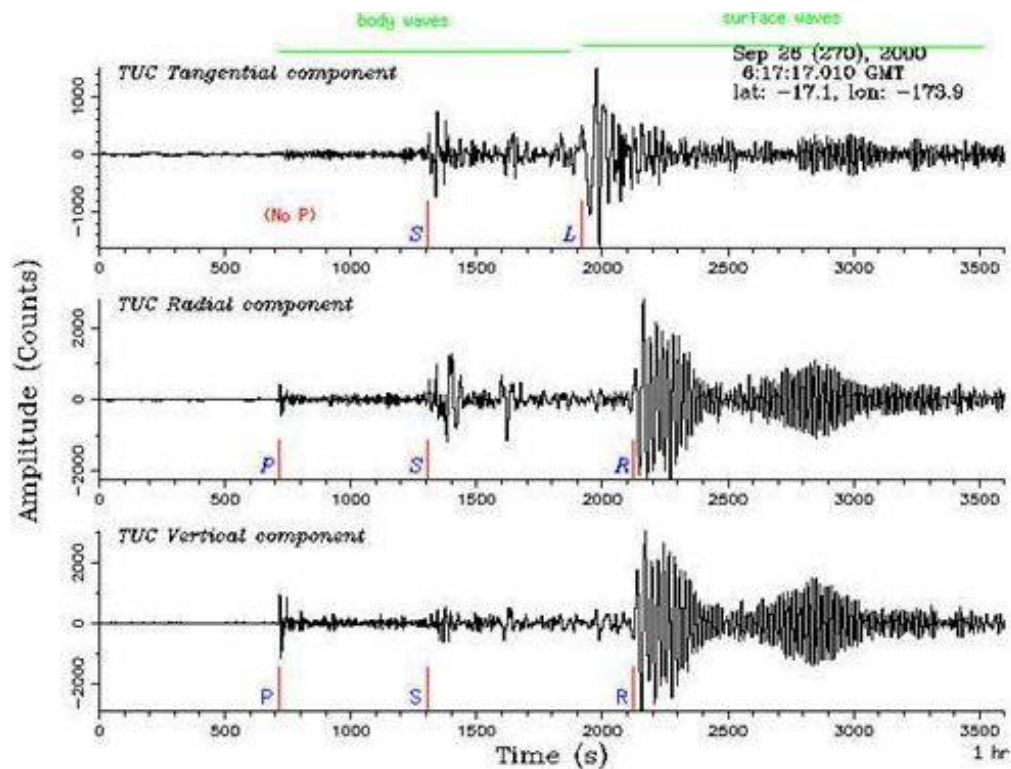
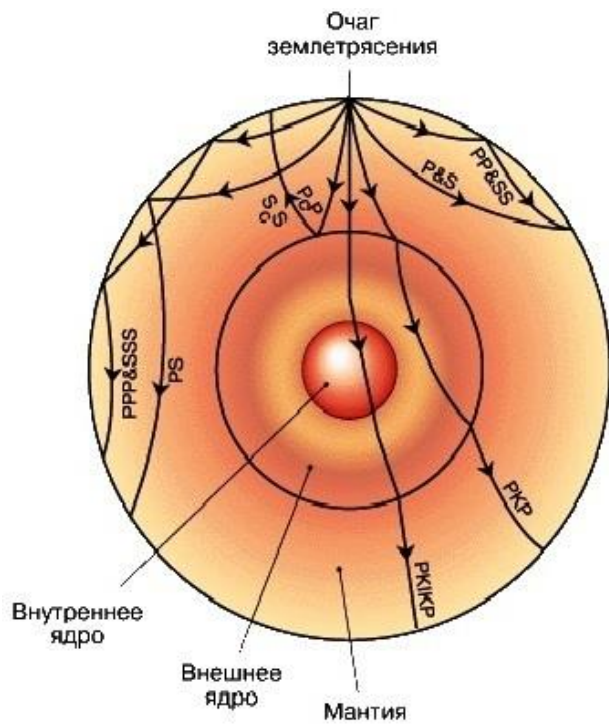
- сейсмика случайно-неоднородных сред;
- геофизический мониторинг;
- нелинейная геофизика; сейсмическая томография;
- вибрационное просвечивание Земли,
- наведенная сейсмичность

**Н.В. Шебалин, Н.В. Кондорская, В.И. Уломов, ...**



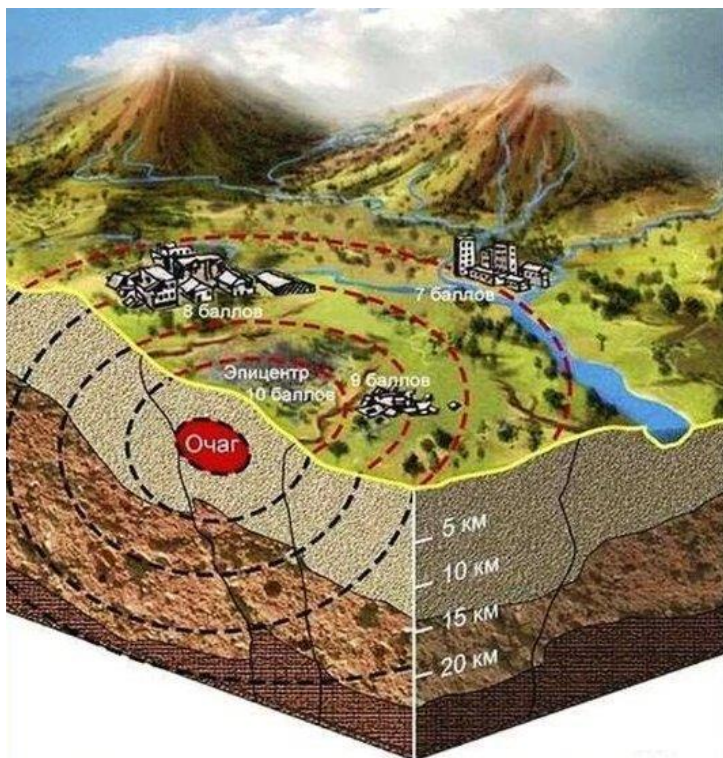


## Преломление (рефракция) объемных P- и S- сейсмических волн в слоистых и градиентных средах



Сейсмограмма удаленного ( $r \sim 4000$  км) землетрясения

## Приочаговые зоны – акселерограммы. Шумовой характер акселерограмм



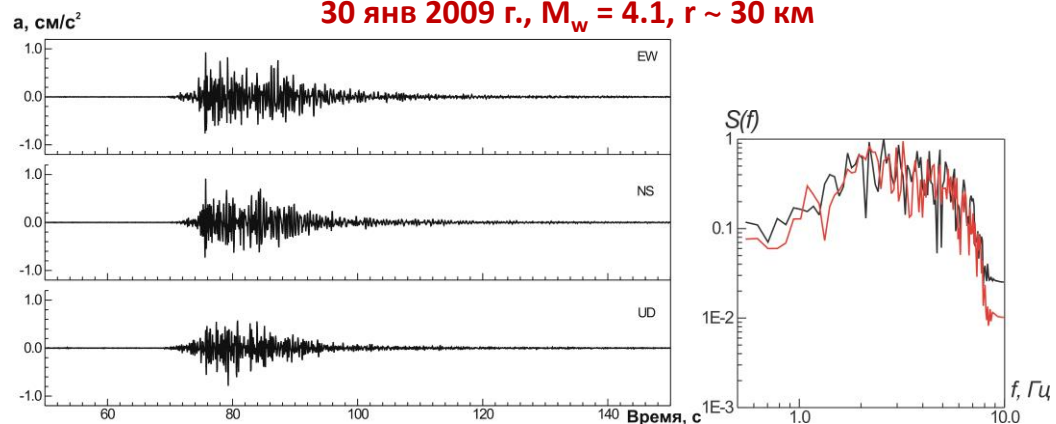
10 баллов – всеобщие разрушения зданий  
9 баллов – всеобщие повреждения зданий  
8 баллов – сильные повреждения зданий  
7 баллов – повреждения зданий

Глубины очагов коровых землетрясений  
обычно 5 – 15 км

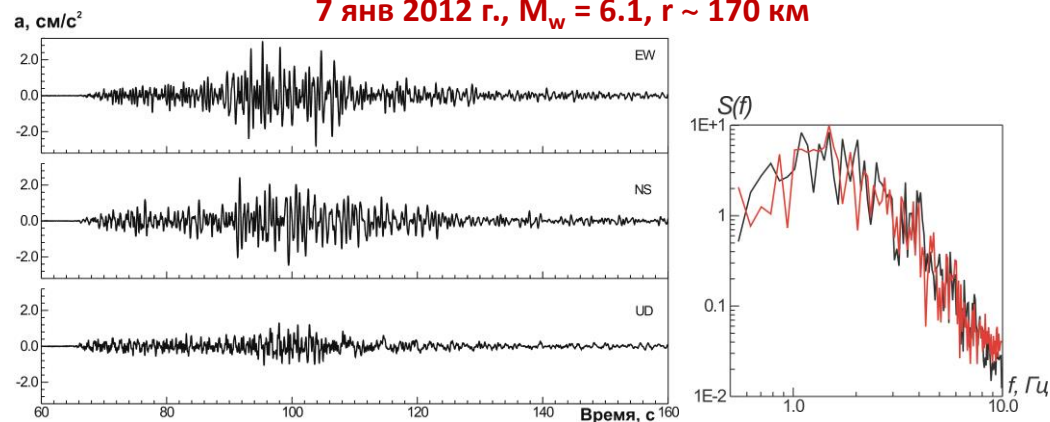
В пределах 100-200 км от очага акселерограммы с хорошей точностью описываются как ограниченный по спектру и по длительности Гауссовский белый шум

Акселерограммы землетрясений,  
записанные сейсмостанцией «Махачкала» (МАК)

30 янв 2009 г.,  $M_w = 4.1$ ,  $r \sim 30$  км



7 янв 2012 г.,  $M_w = 6.1$ ,  $r \sim 170$  км



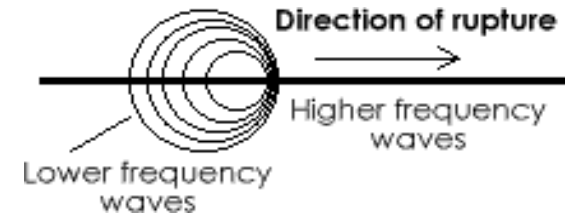
**Engineering Seismology** – изучение **очагов землетрясений** (их **размеров и механизмов генерации сейсмических волн**), **распространения сейсмических волн от источника к инженерным сооружениям**, характеристик движения грунта на площадке объекта и **оценки движений грунта для инженерного проектирования**



**Механизм очага**  
азимут, наклон, глубина и размеры разломной плоскости

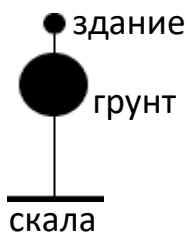
**Магнитуда**

**Механизм разрыва:** сброшенное напряжение, точка начала разрыва, скорость вспарывания, подвижки



**Эффекты пути распространения**  
Геометрическое расхождение, частотно-зависимое неупругое поглощение и рассеяние, увеличение **длительности** сигналов вследствие эффектов распространения и рассеяния

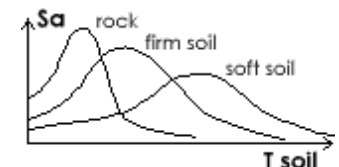
**Локальные условия в точке приема**



Грунт ведет себя как **динамический осциллятор**, существенно влияющий на колебания построенных на нем зданий

Влияние грунта (усиление, резонансы, нелинейность отклика грунта), эффекты топографии поверхности и внутренних границ

Более мягкие, рыхлые и мощные слои грунта дадут больший диапазон преобладающих частот



**Исследования динамического поведения грунтов после катастрофических землетрясений 1960-70-х годов связано с началом строительства атомных станций**



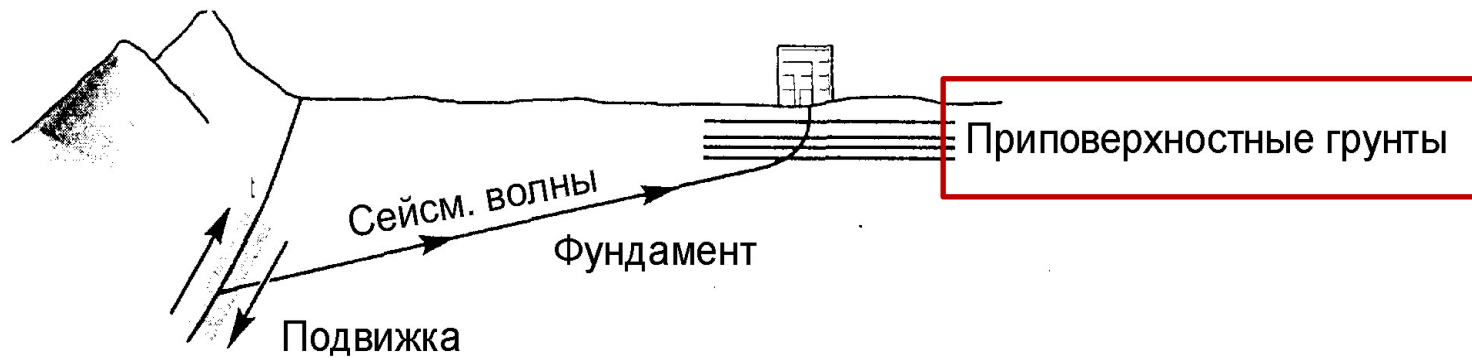
**Землетрясение в Анкоридже 27 марта 1964,  $M = 9.1$**     **Землетрясение в Ниигате 16 июня 1964  $M = 7.5$**



**Землетрясение в Сан Фернандо  
9 февраля 1971,  $M = 6.6$**



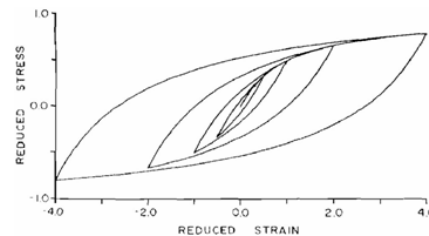
В речных долинах в сейсмоопасных районах расположены такие большие города мира как Токио, Осака, Кобе, Лос-Анжелес, Сан-Франциско, Сан-Сальвадор, Каракас, Лима, Богота, Катманду, Манила, Салоники, Мехико и другие



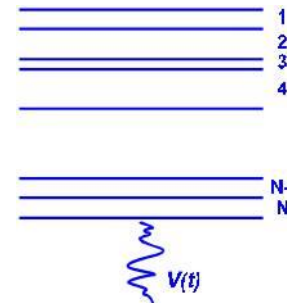
Методы расчета отклика грунта (1970-80-е годы):

**эквивалентный линейный анализ:** SHAKE, QUAD-4, FEADAM, LUSH, FLUSH, FDEL,...

**нелинейный анализ:** DESRA, TARA, CHARSOIL, TESS1, MASH, NONLIZ,...



Hardin, Drnevich, 1972



## Расчет отклика грунта при землетрясении

### Нелинейный анализ: алгоритм NONL13 (Joyner and Chen, 1975)

1. На каждой границе известна  $V_i$  - колебательная скорость в момент  $t$  и нормализованное напряжение  $s_i$  в момент  $(t-\Delta t)/2$  ( $\Delta t$  - шаг по времени)
2. Рассчитываются изменения деформаций  $\Delta e_i$  в слое  $i$  в интервале  $\Delta t$ :

$$\Delta e_i = (V_{i+1} - V_i) k_f \Delta t / \Delta x_i,$$

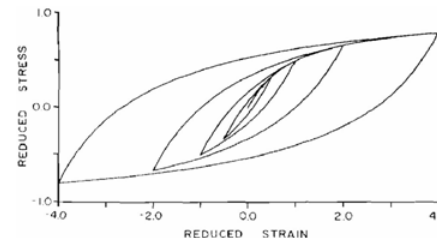
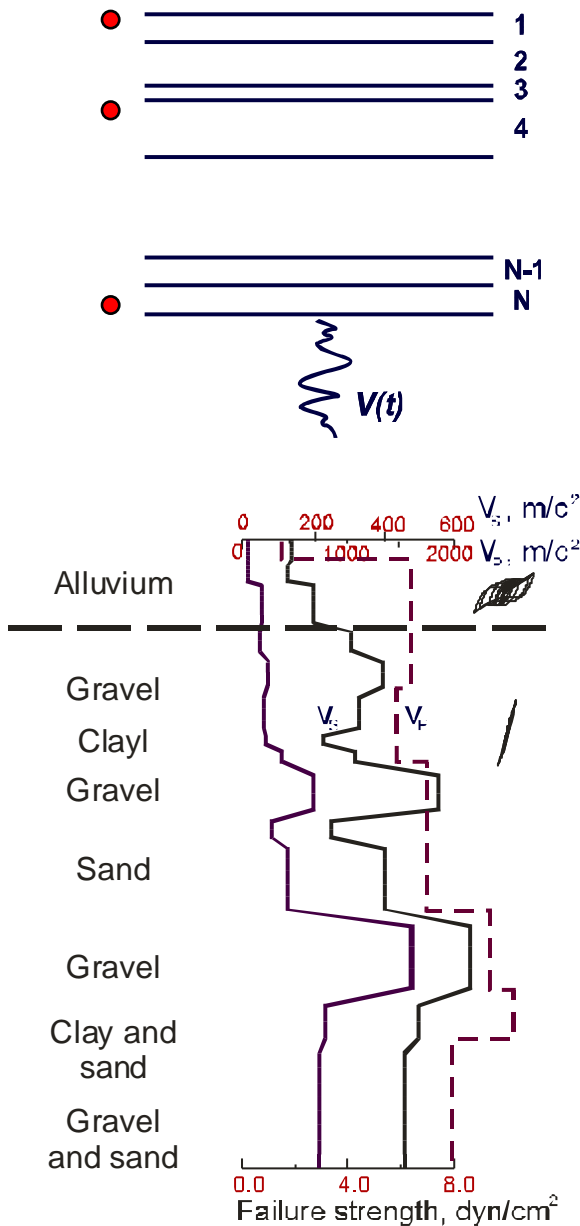
где  $\Delta x_i$  - мощность слоя,

$k_f = G_{max} / \tau_{max}$  - нормировочный коэффициент

3. По  $\Delta e_i$  и зависимости напряжение-деформация рассчитывается напряжение в момент  $(t+\Delta t)/2$
4. По напряжениям в слоях выше и ниже границы в момент  $(t+\Delta t)/2$  рассчитывается новое значение колебательной скорости на границе в момент  $(t+\Delta t)$ :

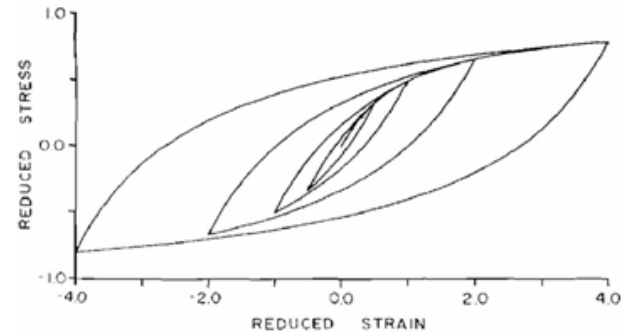
$$V_{i+1}(t+\Delta t) = V_{i+1}(t) + [(\tau_{max})_{i+1} s_{i+1} - (\tau_{max})_i s_i] \Delta t / m_{i+1},$$

$m_{i+1}$  - масса единицы объема в слое  $(i+1)$



## РАСЧЕТ ОТКЛИКА ГРУНТА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

- ❑ Полевые и лабораторные методы дают лишь ограниченную информацию о динамических свойствах грунтов. Наиболее перспективный подход – интерпретация наблюдений поведения грунтов *in situ*
- ❑ Грунты – многофазные среды, но в сейсмологии они рассматриваются как сплошные и описываются диаграммами сжатия и сдвига, учитывающими содержание и свойства их компонентов.
- ❑ Зависимости напряжение–деформация – это модели поведения грунтов в условиях динамического нагружения



**Грунтовые слои существенно изменяют как уровень, так и спектральный состав колебаний поверхности**

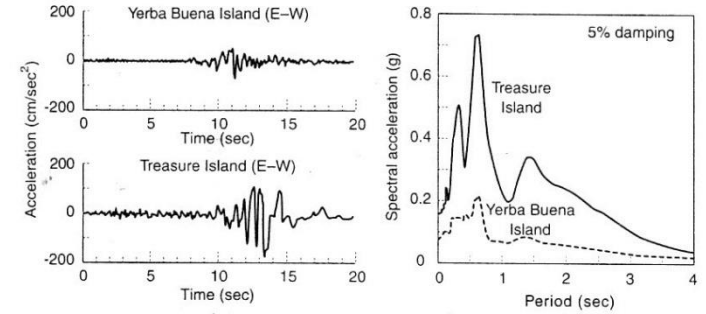
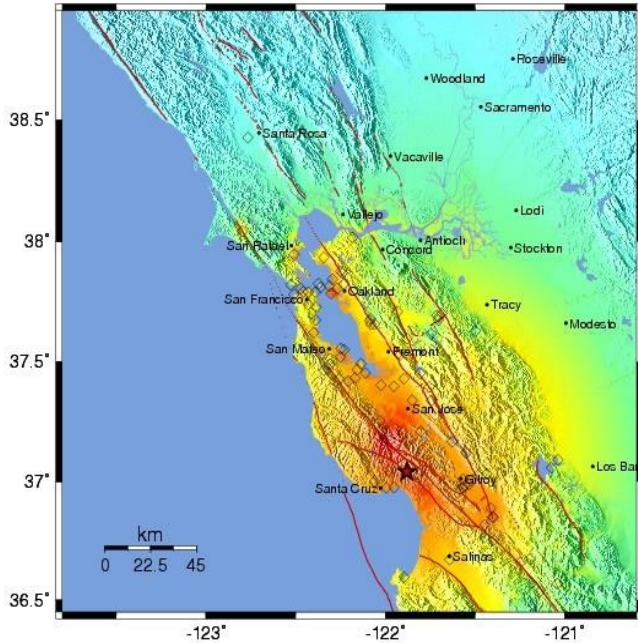
### **Механизмы преобразований сейсмических волн в грунтовых слоях:**

- ❑ Переход сейсмических волн в верхние слои с меньшими значениями  $V_s$  и  $r$  ведет к их усилению, в соответствии с законом сохранения плотности потока сейсмической энергии
- ❑ Резонансные колебания в грунтовых слоях также приводят к усилению сейсмических волн
- ❑ Нелинейность зависимости напряжение-деформация в грунтах приводит к снижению амплитуд сейсмических колебаний

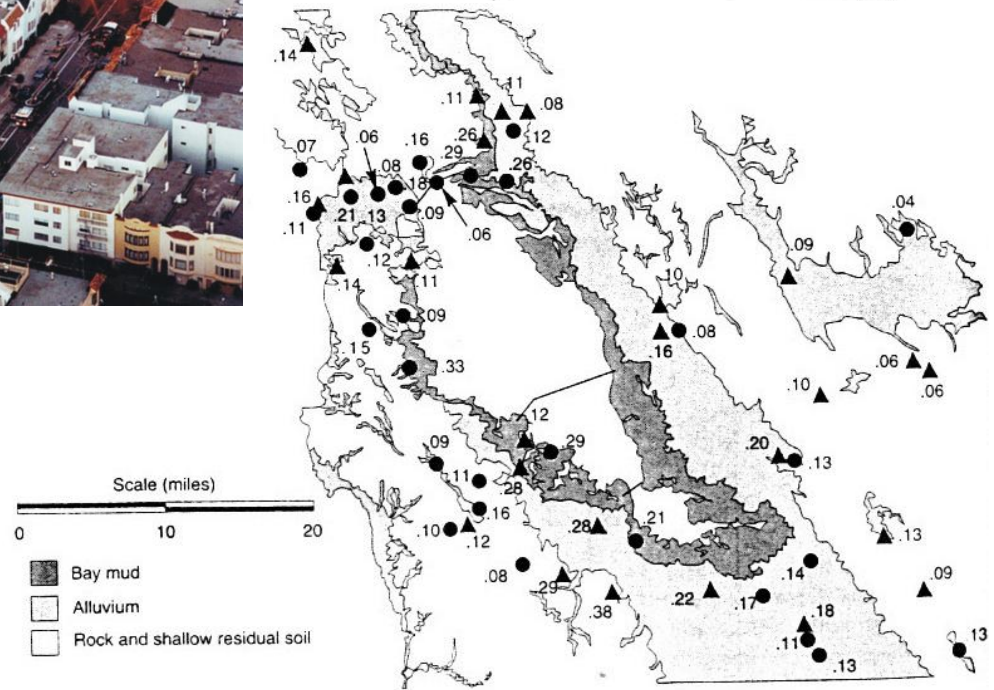
# 1. Усиление сейсмических волн в грунтовых слоях

## Землетрясение 17 октября 1989 г. в Лома Приета (США) ( $M \sim 7.1$ , $r \sim 100$ км)

MMI ShakeMap for the 1989 earthquake determined from seismic recordings

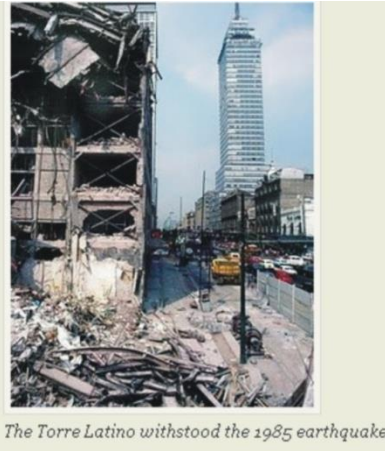
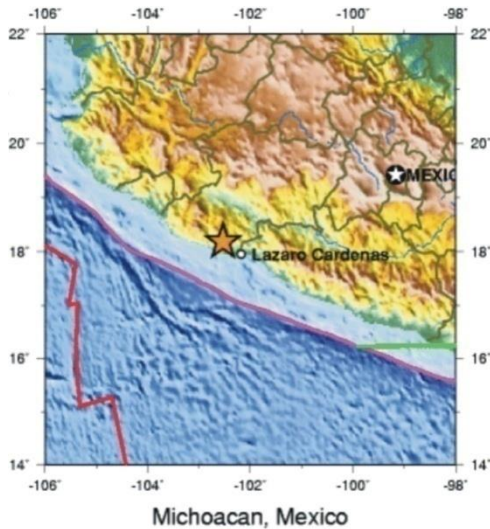


PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC (%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

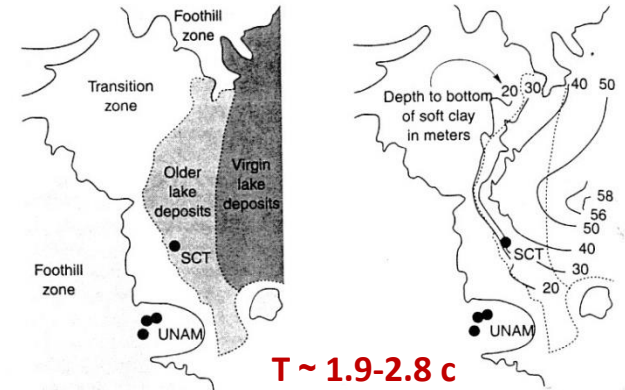
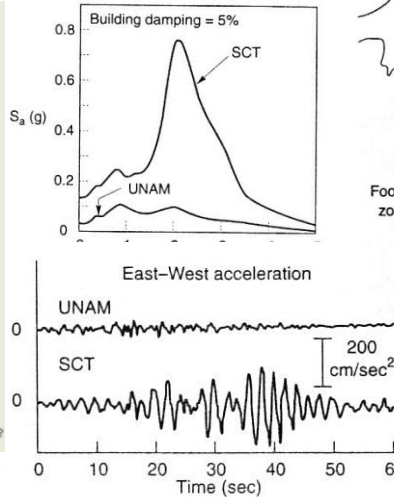


## 2. Резонансные явления в грунтовых слоях: двойной резонанс, в грунтах и в зданиях

### Землетрясение 19.09 1985 г. в Мехико (M ~ 8.1, r ~ 350 км)



The Torre Latino withstood the 1985 earthquake



$T \sim 1.9-2.8$  с



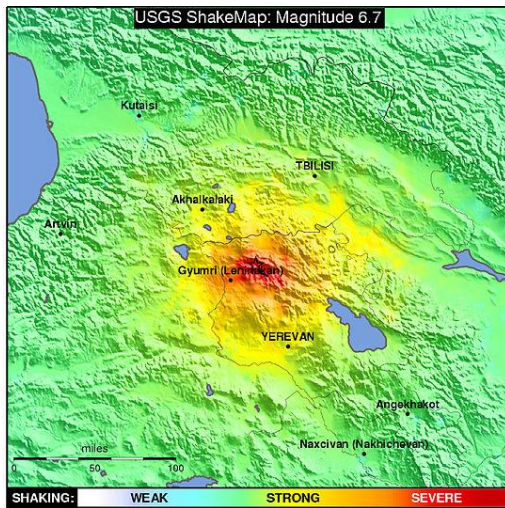
### Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. (M ~ 7.0)

Разрушены или сильно повреждены здания в 5-20 этажей на озерных отложениях (в центре города)  $T \sim N/10$  с

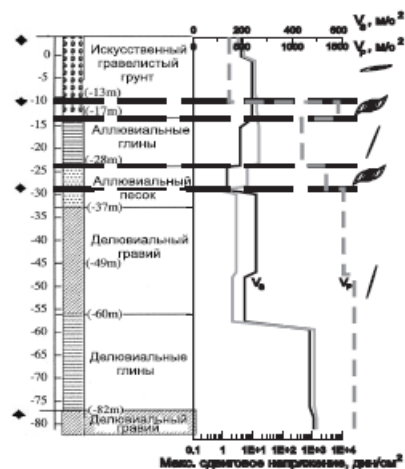
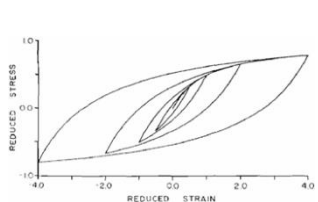
Разрушены более 300 населенных пунктов: Спитак, Ленинакан, Степанаван, Кировакан и др.; Погибло более 25 000 человек

В Ленинакане разрушены здания, периоды собственных колебаний которых ~ 0,3 – 0,9 с совпали с периодами собственных колебаний подстилающих грунтов - суглинков с туфами и супесями

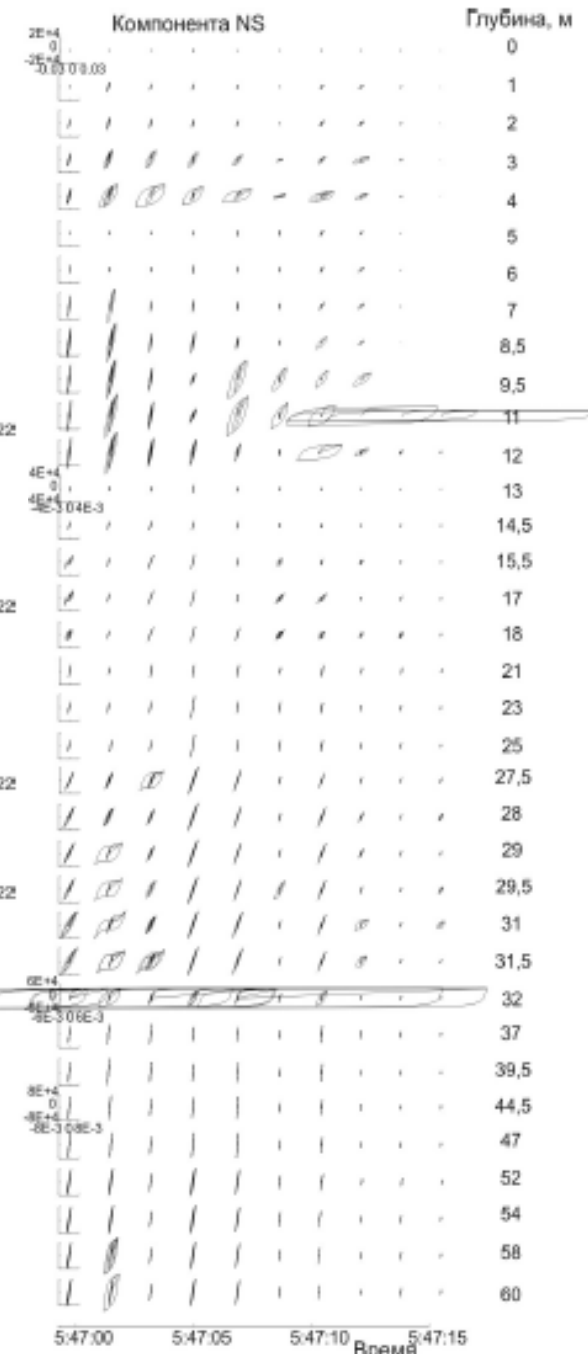
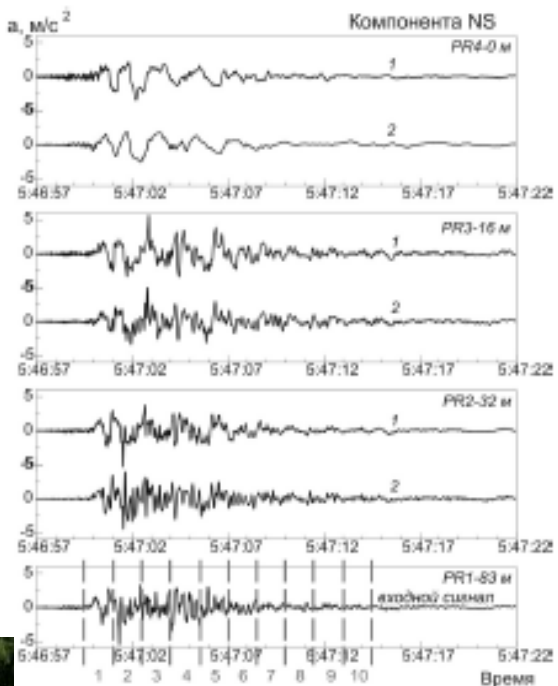
$h \sim 20-70$  м



### 3. Нелинейность поведения грунта. Разжижение



Порт Айленд

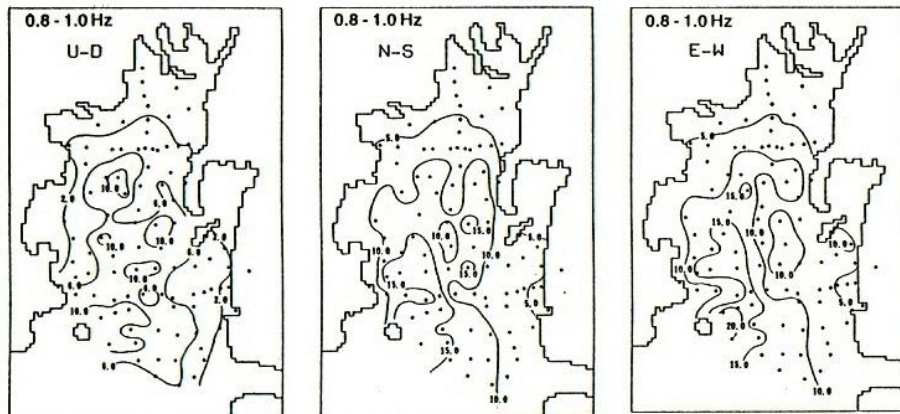
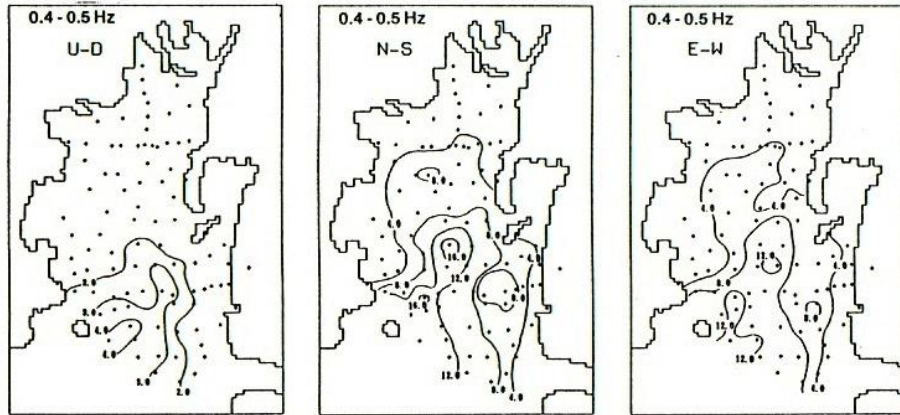
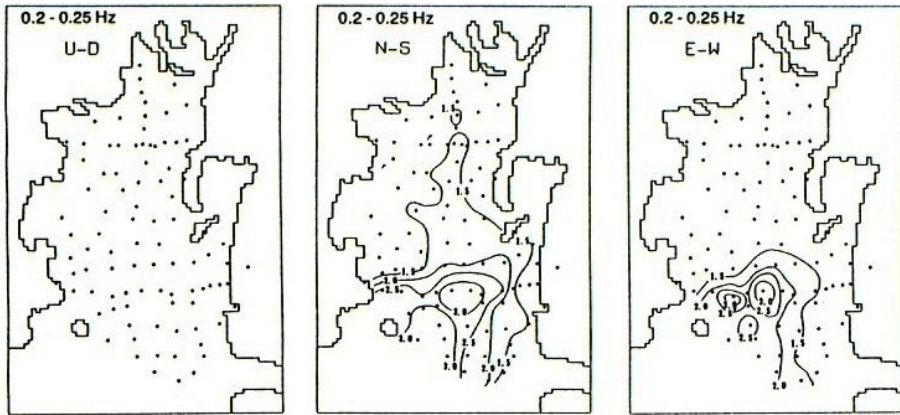


Землетрясение в Кобе 1995 г.  
M ~ 6.8, Порт Айленд

Новая Зеландия, Крайсчерч  
22 февраля 2011 г. M = 6.3



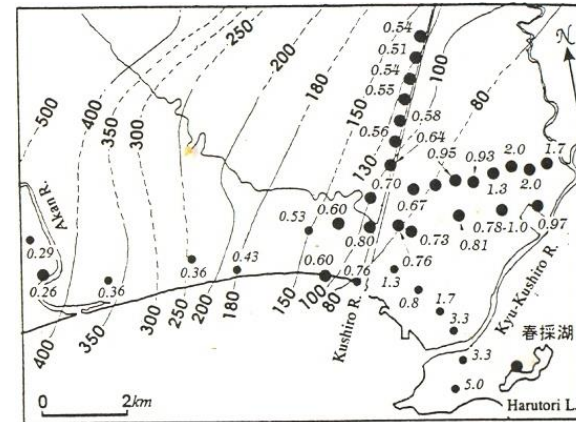
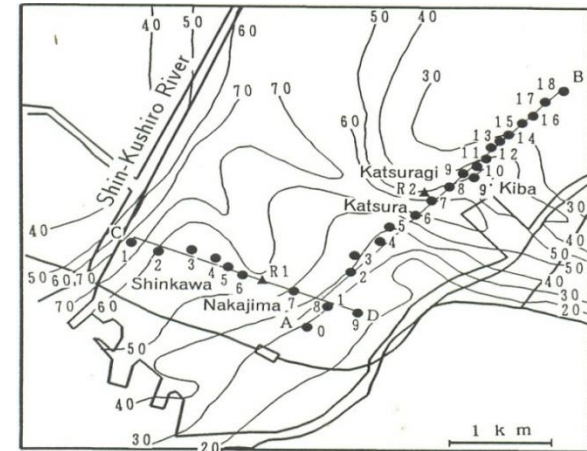
# Изучение параметров грунтовых толщ в осадочных бассейнах



Microzonation of a sedimentary region based on comparative analysis of microseisms and gravity anomaly (J. Akamatsu, K. Nishimura, M. Komazawa), Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Seismic Zonation, Nice, France, 1995

Коэффициенты  
усиления  
в осадочном бассейне  
Киото

Пункты регистрации  
сейсмических  
шумов в Куширо и  
мощности аллювия  
(м)



Частоты максимумов  
N/V и мощности  
Плейстоценовых  
толщ (м)

Оценивание мощностей грунтовых толщ и  
преобладающих  
частот колебаний по гравитационным аномалиям


**NIED**  
 National Research Institute  
 for Earth Science and Disaster Prevention

PAGE ACCESS 0010205700  
 DATA DOWNLOAD 0220007800

**Strong-motion  
 Seismograph Networks  
 (K-NET, KiK-net)**

[Japanese](#)

[Top](#) | [Introduction](#) | [Download](#) | [Topics](#) | [User info](#) | [Manual](#) | [Links](#)

[Top Page](#)

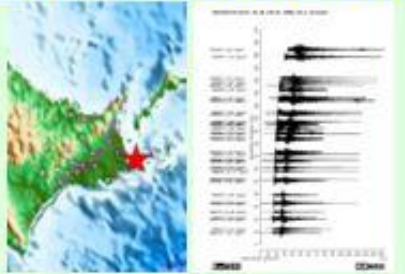
**Important Announcement**

This is a unified Website for K-NET and KiK-net, the NIED strong-motion seismograph networks. Strong-motion data are available from the download pages listed in the menubar above. For first-time visitors, please see an [introduction of K-NET and KiK-net](#).

**For First-time Visitors:**

- About Strong-motion Seismograph Network: (K-NET, KiK-net)**  
 K-NET is a network of strong-motion seismographs installed at approximately 1,000 locations nationwide.  
 KiK-net consists of pairs of strong-motion seismographs installed in a borehole and on the ground surface.
- About User Registration**  
 User registration is required to download strong-motion data.
- Easy Download**  
 You can download the strong-motion data in the simplest way from this page.

**K-NET & KiK-net Data Due to the Latest Earthquake**



2016/03/24-16:57:00.00  
 43.30N 145.50E 100km M4.2

[Details](#) | [Download All Data](#)

**Link to Realtime ground-motion monitoring system (Kyochin monitor)**

- Realtime ground-motion monitoring system**



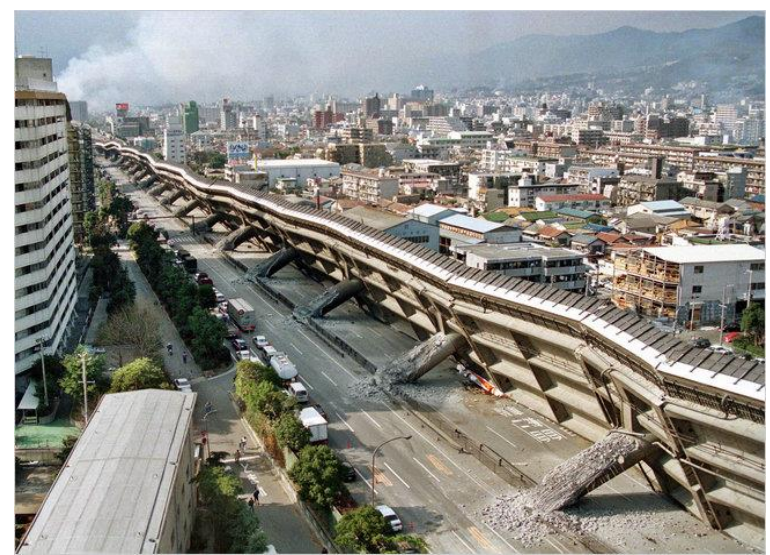
[Realtime ground-motion monitoring system \(Kyochin monitor\) #1](#)  
[Realtime ground-motion monitoring system \(Kyochin monitor\) #2](#)
- New Realtime ground-motion monitoring system (Test operation)**



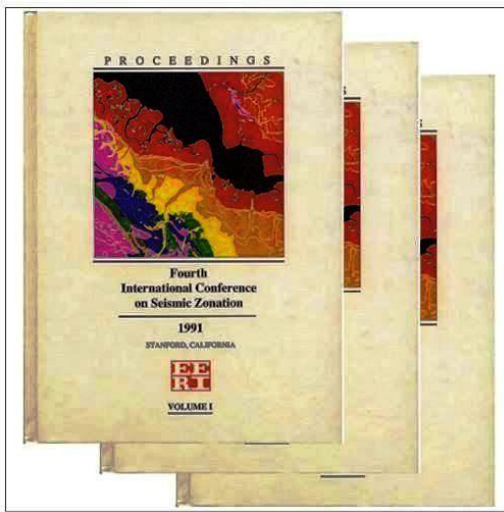

**NEW** New Realtime ground-motion monitoring system



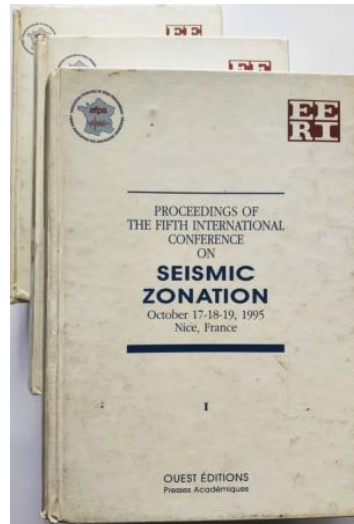
После катастрофического землетрясения в Кобе 17.01.1995 г. в Японии развернуты сети сильных движений K-NET – более 1000 наземных акселерометров и KiK-net – более 700 вертикальных групп



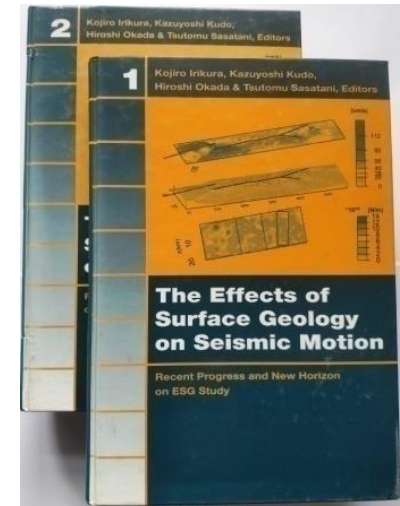




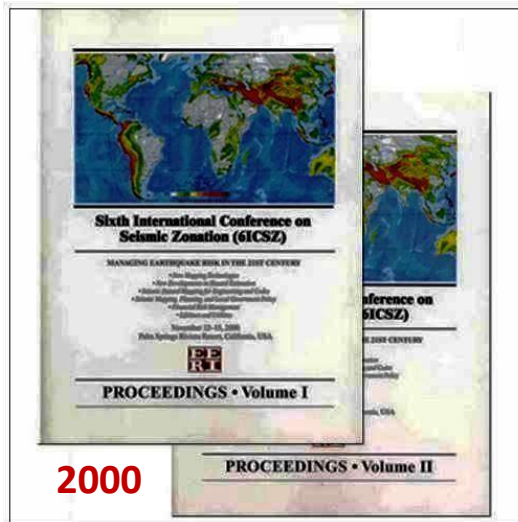
1991



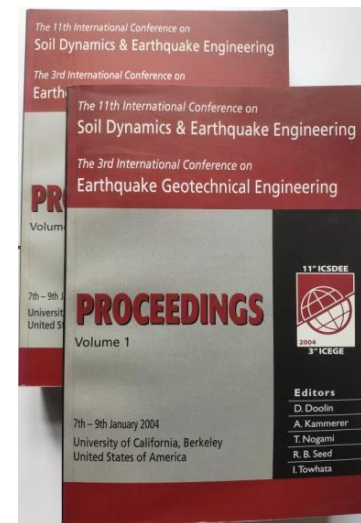
1995



1998



2000



2004

4-th International Conference on Seismic Zonation, Stanford, California, USA, 1991

5-th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, 1995

2-d International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Japan, Yokohama, 1998

6-th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, California, USA, 2000

3-d International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, California, USA, 2004

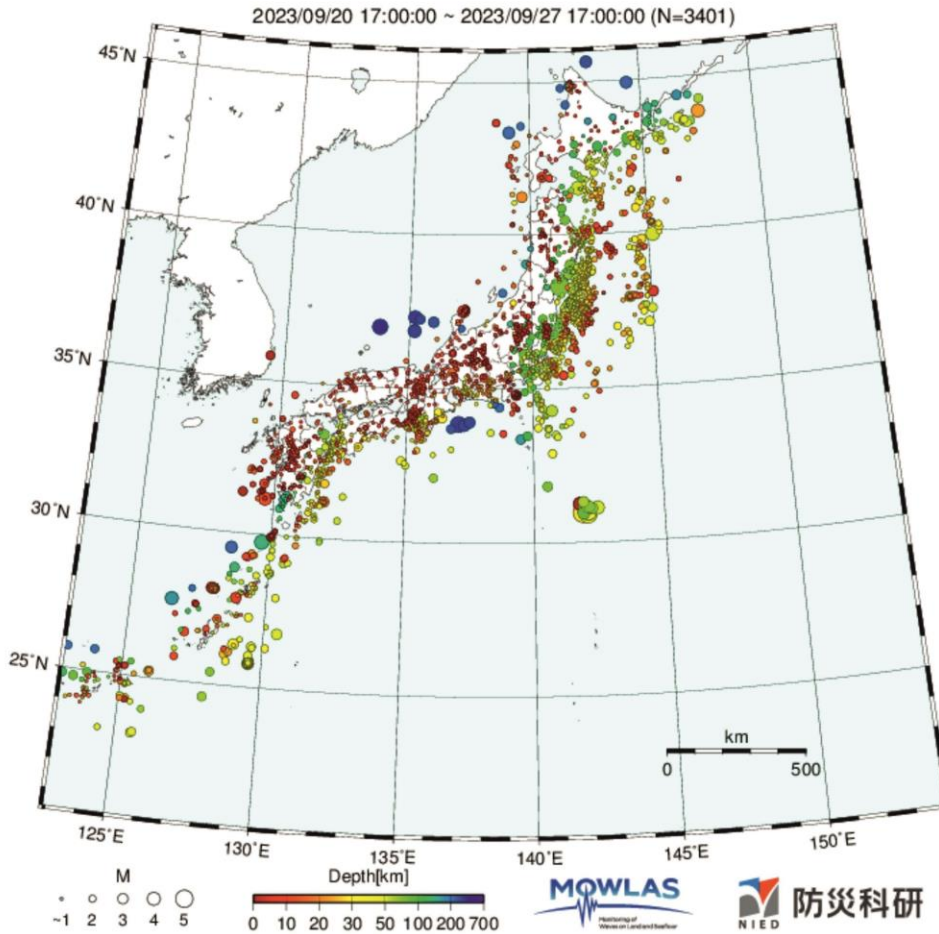
## Hi-net Hypocenter Maps

Earthquake locations for the past 30 days. Earthquake locations are from the NIED Hi-net automatic hypocenter determination system (last 2 days) and the JMA unified hypocenter catalog (older than 2 days).

Regional Maps:

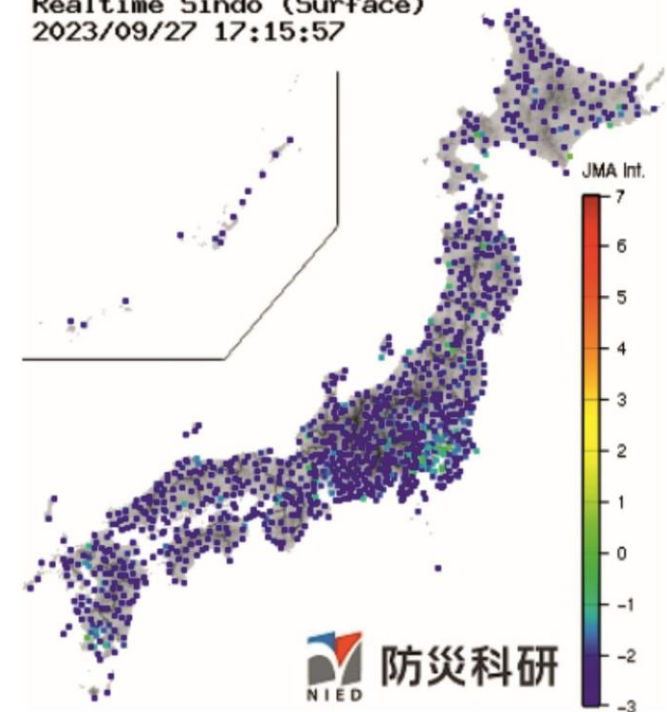
Prefecture Maps:

### Japan and Outlying Areas Last 7 days Seismicity in the

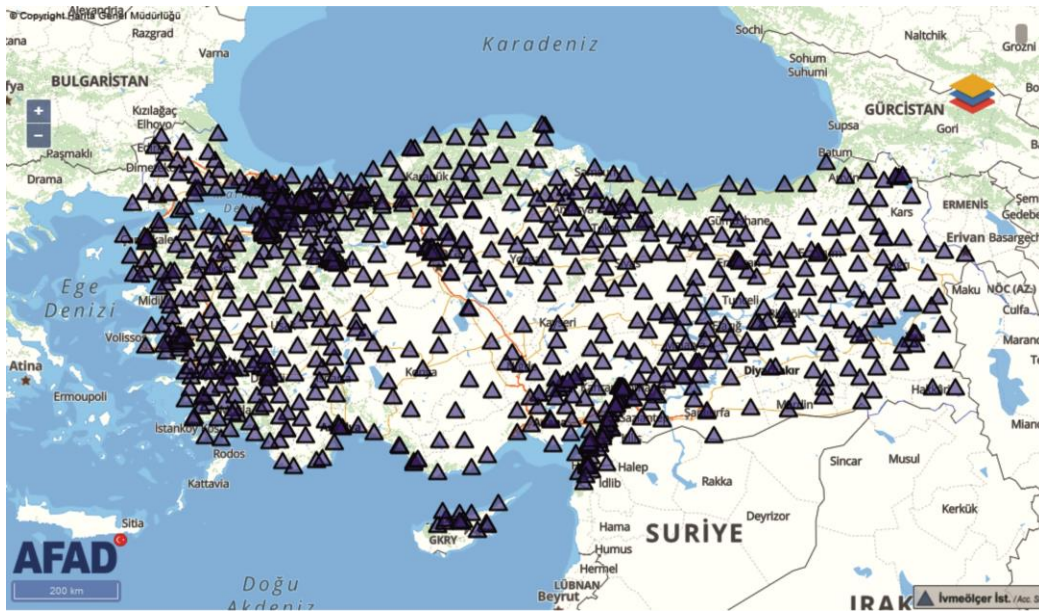


[強震モニタの利用条件等はこちら](#)

Realtime Sindo (Surface)  
2023/09/27 17:15:57

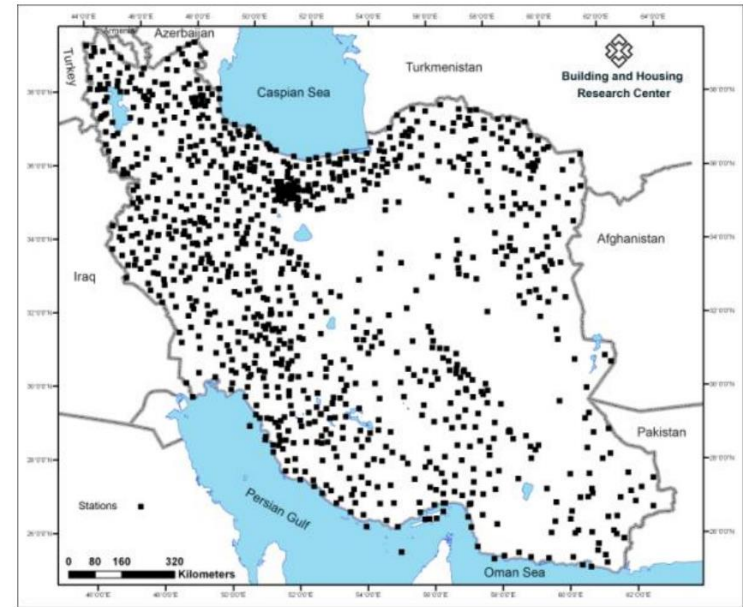


**NIED - National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience**



**Сети сейсмостанций**

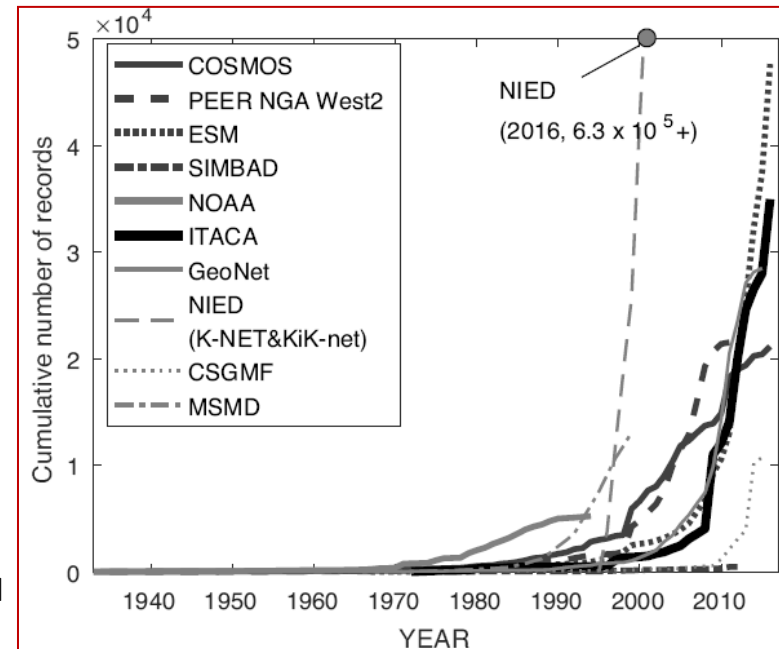
**в Турции**



**в Иране**

США - более 13000 сейсмостанций,  
 Япония ~4000 сейсмостанций, ~1000 вертикальных групп,  
 Иран ~1140 сейсмостанций,  
 Китай ~1000 сейсмостанций,  
 Турция и Италия по ~800 сейсмостанций,  
 Франция ~600 сейсмостанций,  
 Австралия, Греция и Швейцария - по ~400 сейсмостанций,  
 Новая Зеландия ~200 сейсмостанций

**Akiko Suzuki, Iunio Iervolino** Italian vs worldwide history of largest PGA and PGV  
 ANNALS OF GEOPHYSICS, 60, 5, 2017; S0551; doi: 10.4401/ag-7391



# МОДЕЛИ ОЧАГА:

детерминистские

стохастические

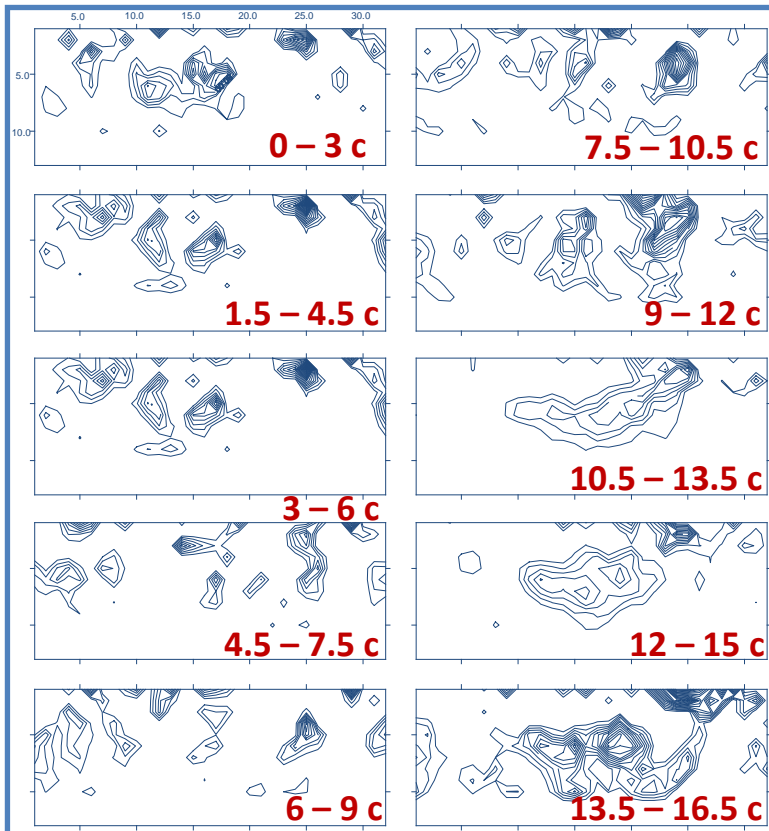
**Колебания поверхности** при землетрясении - результат пространственно-временной конволюции функции подвижки в очаге с функцией Грина, представляющей отклик земной среды (Аки, Ричардс, 1980)

**Колебания поверхности** при землетрясении - случайный шум, ограниченный по частоте в полосе от корнер-частоты  $f_0$  до верхней частоты  $f_{max}$ ; форма спектра определяется по **закону масштабирования** (Brune, 1970,1971) сейсмическим моментом  $M_0$  и параметром напряжения  $\Delta\sigma$

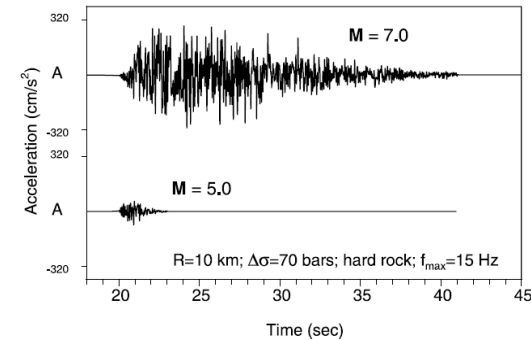
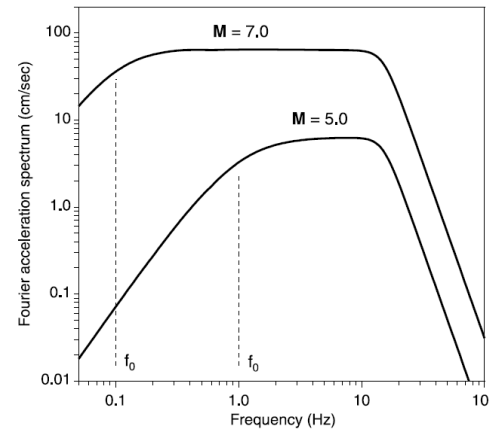
Обратная задача: (Kikuchi, Kanamori, 1982; Ruff, Kanamori, 1983; Archuleta, 1984; Hartzell, Heaton, 1985, 1986; etc.)

$$f_0 = 4.9 \cdot 10^6 \cdot V_s (\Delta\sigma / M_0)^{1/3}$$

$V_s$  – в км/с,  $\Delta\sigma$  – в барах,  $M_0$  – в дин см



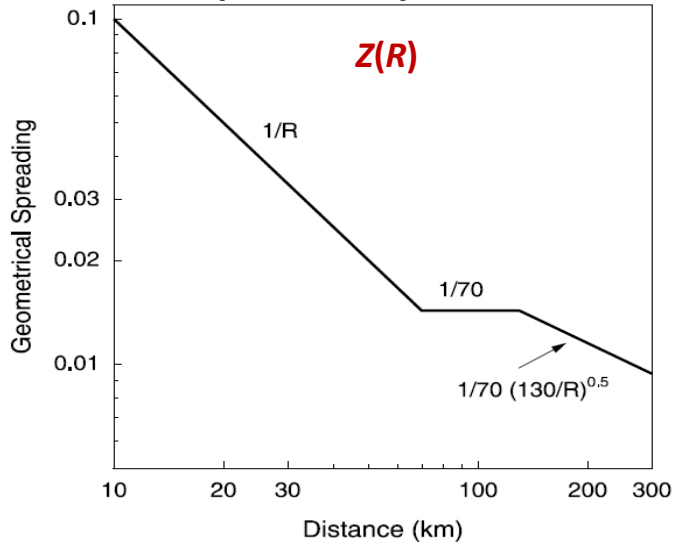
Землетрясение в Чи-Чи (Тайвань) 1999



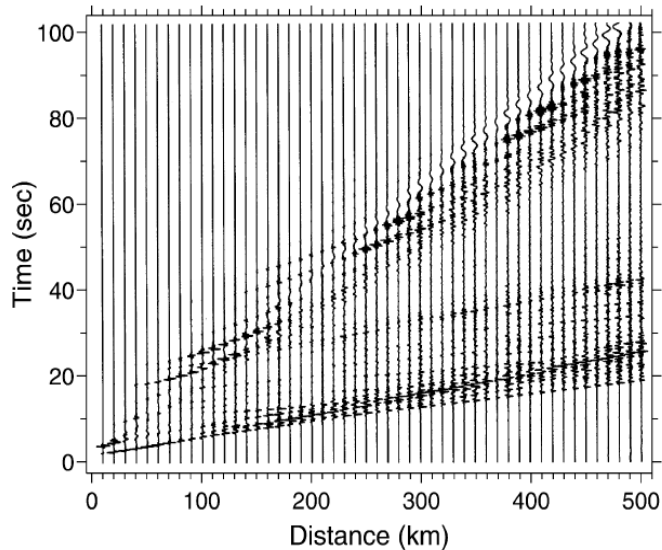
$\Delta\sigma$  зависит от региона,  $M$ , типа подвижки, глубины очага,..

**Модель  $\omega^2$**  (Аки, 1967; Hanks, McGuire, 1981) широко используется как основа для предсказания амплитудных спектров и пиковых скоростей сильных движений в инженерных приложениях

## Геометрическое расхождение



Зависимости  $Z(R)$ , использованные Atkinson, Boore, 1995 для сев-вост США;  $R$  – ближайшее расстояние до разломной плоскости



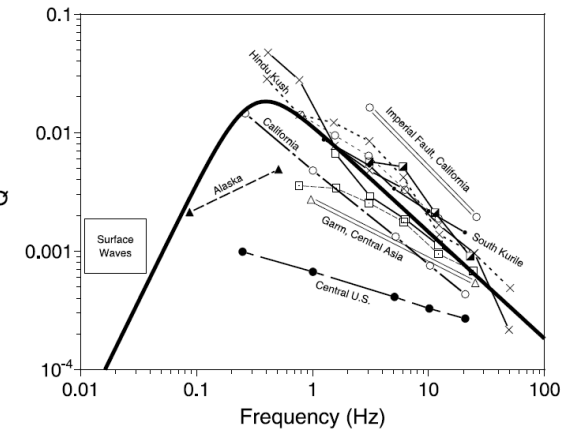
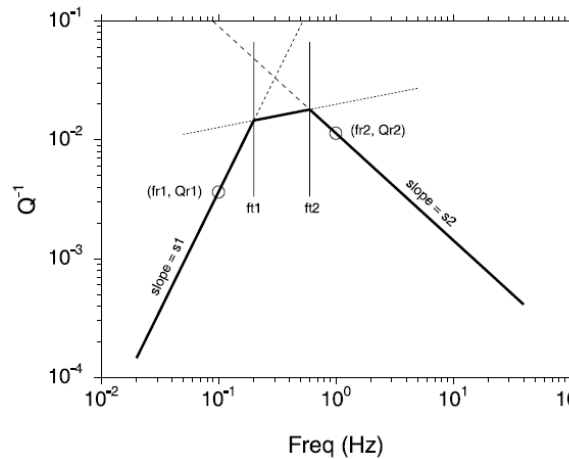
## ЭФФЕКТЫ ПУТИ $P(R, f)$

Могут быть описаны простыми функциями для учета:

- геометрического расхождения волн,
- затухания (неупругого поглощения и рассеяния)
- увеличения длительности сигнала с расстоянием из-за эффектов распространения и рассеяния

$$P(R, f) = Z(R) \exp\{-\pi f R / Q(f) \beta\}$$

Добротность среды  $Q(f)$  (обратная поглощению) может быть оценена по записям слабых землетрясений



Синтетические сейсмограммы для 4-слойной модели коры в центральных США: реверберация в земной коре (Herrmann, 2000)

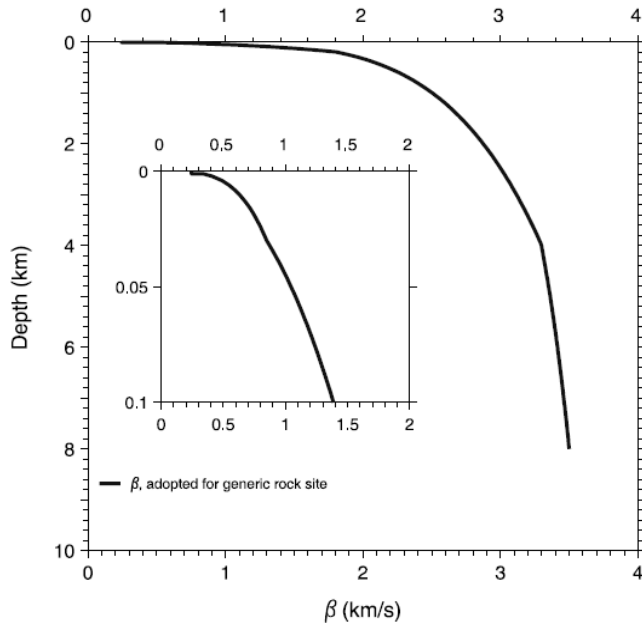
Волновые формы усложняются в реальности из-за горизонтальной неоднородности коры и рассеяния на случайных неоднородностях

# ЛОКАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ $G(f)$ (без учета влияния грунта)

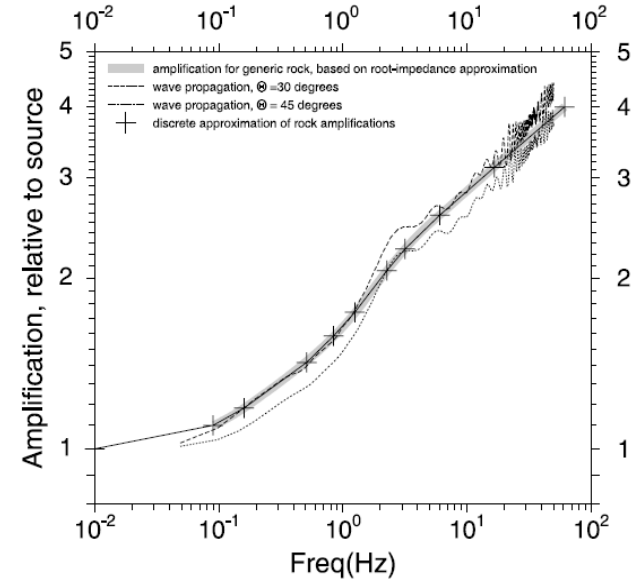
$$G(f) = A(f) D(f)$$

Усиление в коре

ослабление (независимое от эффектов пути)



$A(f)$  – усиление вследствие снижения импедансов при распространении волн из очага к земной поверхности

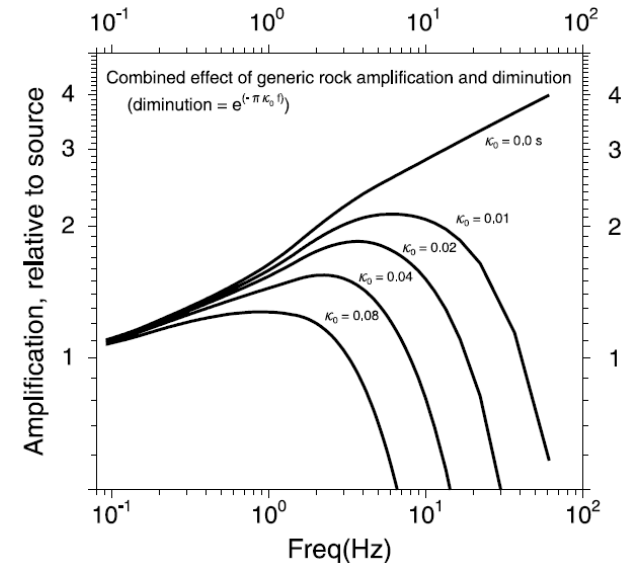


$D(f)$  – ослабление высокочастотных компонент; по мнению разных авторов, очаговый либо локальный эффект, либо их комбинация

описывается выражением:

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$$

Комбинированный эффект локального усиления и независимого от пути ослабления



# Входные данные программы D. Voore (без учета отклика грунта)

rho, beta, prttn, radpat, fs:  
2.4 3.2 0.707 0.55 2.0

spectral shape: source number (1=Single Corner;2=Joyner;3=A93;4=custom),  
pf, pd (1-corner spectrum =  $1/(1+(f/fc)**pf)**pd$ ; 0.0 otherwise)  
(usual: pf=2.,pd=1.; Butterw.: pf=4.,pd=0.5: power of h-f decay --> pf\*pd)

1 2.0 1.0

spectralscaling: stressc, dlsdm, fbdfa, amagc  
(stress=stressc\*10.0\*\*(dlsdm\*(amag-amagc))  
(fbdfa, amagc for Joyner model, usually 4.0, 7.0)

50. 0.0 4.0 7.0

gsprd: r\_ref, nsegs, (rlow(i), a\_s, b\_s, m\_s(i)) (Usually set r\_ref = 1.0 km)

1.0

3

1.0 -1.0 0.0 6.5

50.0 0.0 0.0 6.5

150.0 -0.5 0.0 6.5

q: fr1, Qr1, s1, ft1, ft2, fr2, qr2, s2, c\_q

1.0 117.0 0.77 0.1 0.1 1.0 117.0 0.77 3.3  $Q(f)=117 \cdot f^{0.77}$

source duration: weights of 1/fa, 1/fb

1.0 0.0

path duration: nknots, (rdur(i), dur(i)), slope of last segment

1

0.0 0.0

0.05

site amplification: namps, (famp(i), amp(i))

4

0.01 1.00

0.16 1.18

2.26 2.06

6.05 2.58

site diminution parameters: fm, **akappa**, dkappadmag, amagkref

100.0 **0.07** 0.0 0.0

low-cut filter parameters: fcut, norder

0.0 2

rv params: zup, eps\_int (int acc), amp\_cutoff (for fup), osc\_crrctn(1=b&j;2=l&p)

10.0 0.00001 0.001 1

window params: idxwnd(0=box,1=exp), tapr(<1), eps\_w, eta\_w, f\_tb2te, f\_te\_xtnd

1 0.05 0.08 0.002 2.0 1.0

timing stuff: dur\_fctr, dt, tshift, seed, nsims, iran\_type (0=normal;1=uniform)

1.3 0.005 1.0 328.0 25 0

$\Delta\sigma = 50$  бар

Геометрическое расхождение:

$1/R$  for  $R < D$  км,

1 for  $D \leq R < 150$  км

Карра:  $\kappa = 0.07$  с

Средняя скорость в коре:  $V_s = 3.2$  км/с

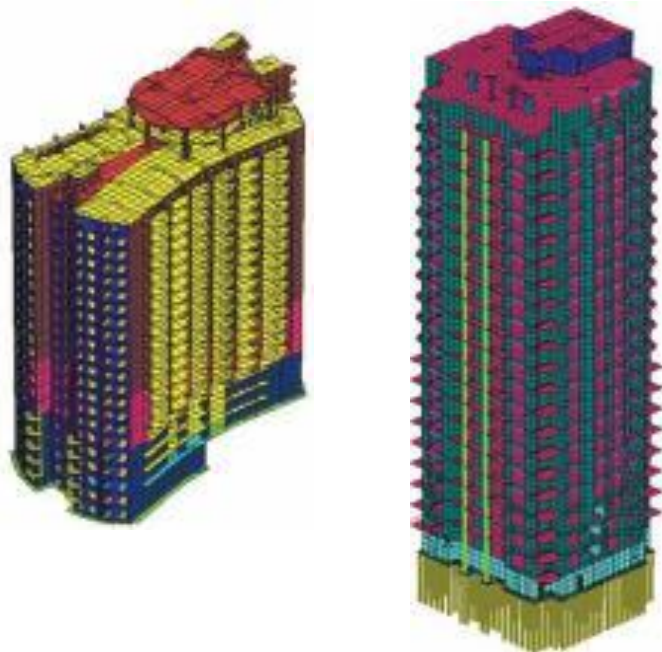
Плотность коры:  $2.6$  г/см<sup>3</sup>

параметры усиления  
сейсмических волн в земной  
коре

«Сообщество пользователей карт сейсмического районирования разнообразно, и требуемые параметры сильных движений также разнообразны. Непрактично готовить многоцелевые карты районирования для удовлетворения всех их нужд.

Нам представляется следующая процедура в будущем.

Поскольку любой параметр может быть получен из акселерограмм, мы должны рассчитывать акселерограммы для заданных пар источник–приемник с использованием современных методов **на основе современных знаний об очагах землетрясений, параметрах пути распространения и локальных условиях в точке приема».**

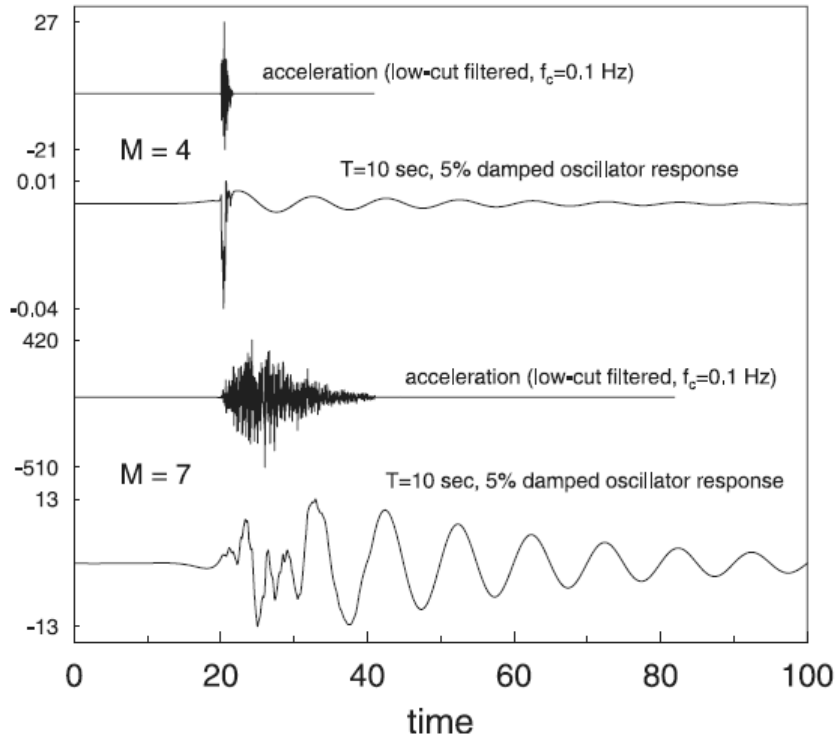


**Aki, K., K. Irikura** Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation, *Proc 4th Int. Conf. on Seismic Zonation, August 25-29, 1991, Stanford, California*, 1, 61-110.

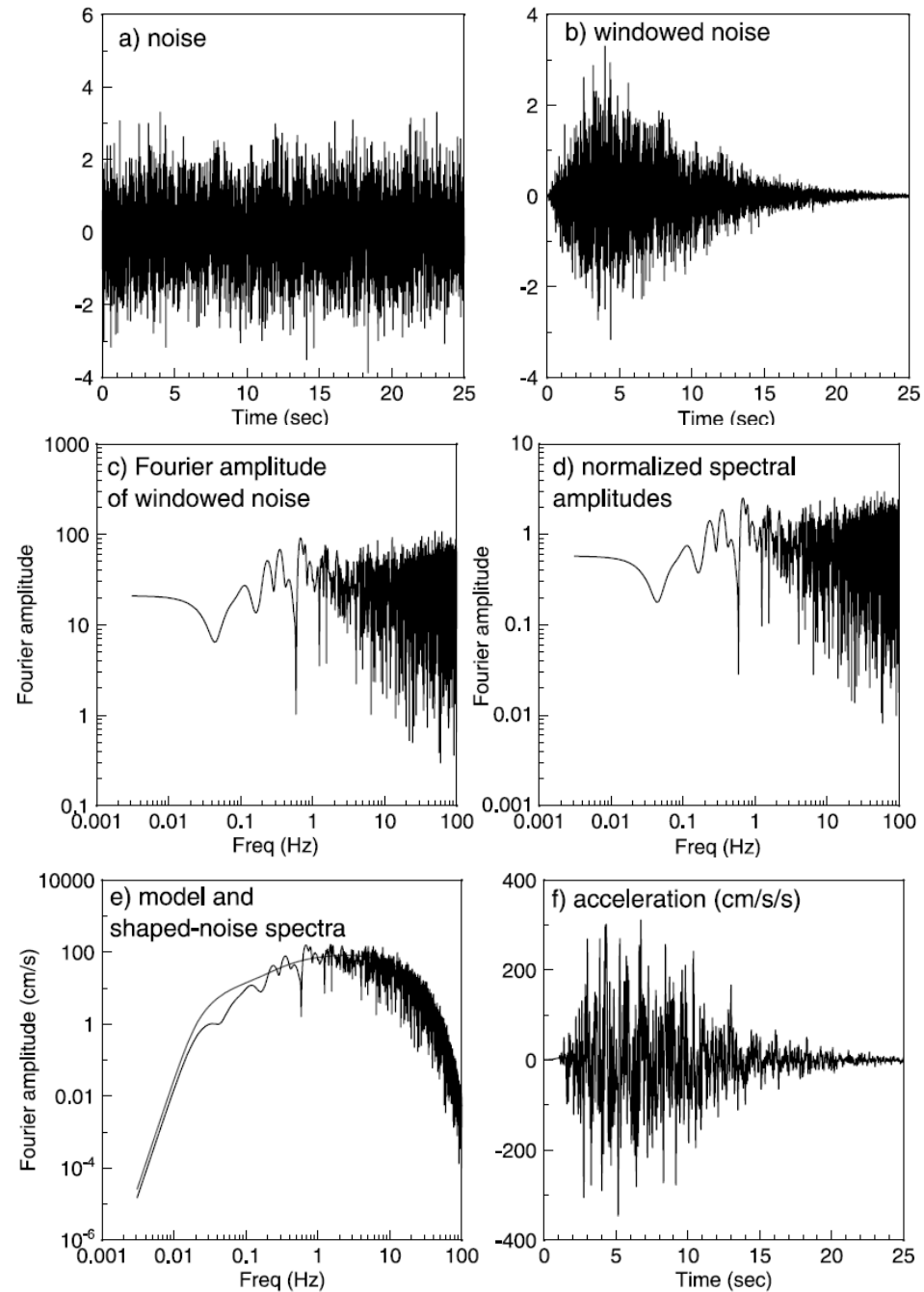


# РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ СТОХАСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

## Точечный источник



Акселерограмма и рассчитанный отклик осциллятора с 5% затуханием для периода 10.0 с  $M=4$  и  $M=7$ , в 10 км от очага ( $R=10$  км)



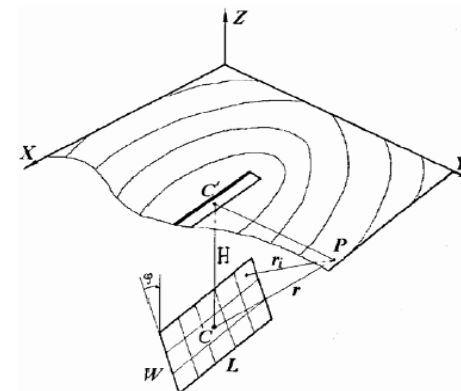
## РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ

### Протяженный источник, общий подход (по А.А. Гусеву)

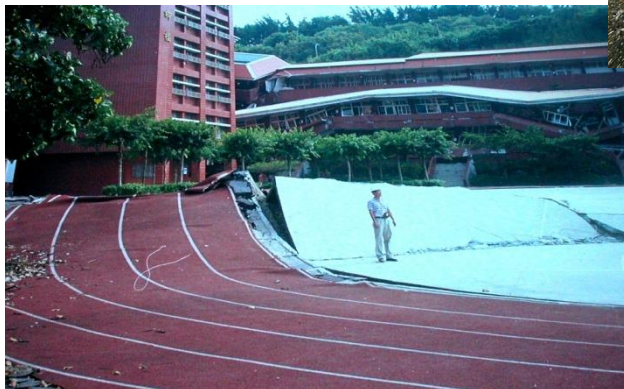
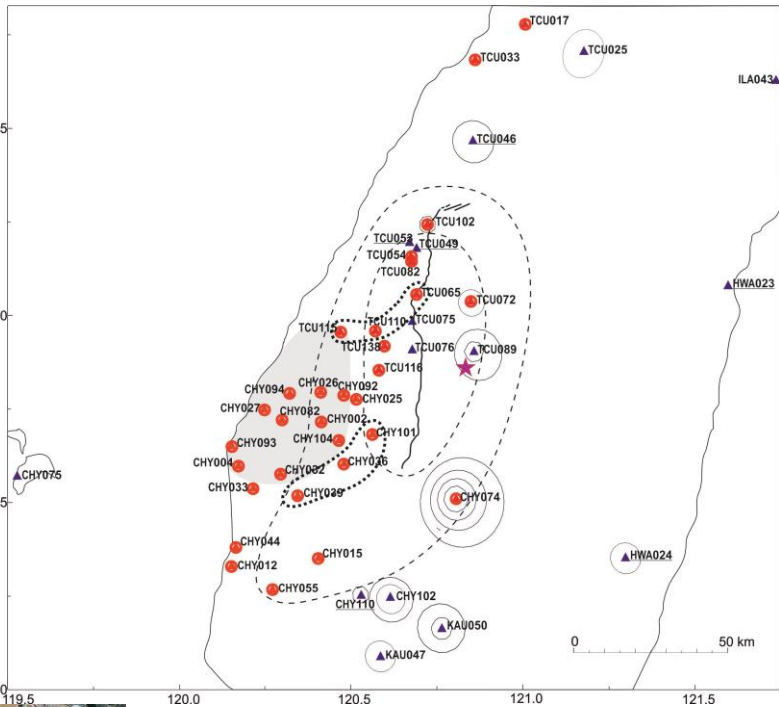
очаг - сетка точечных субочагов с адекватным размером ячеек (сравнимым с удалением станции от разломной плоскости) генерирующих временные серии – сейсмограммы

#### Принципы моделирования:

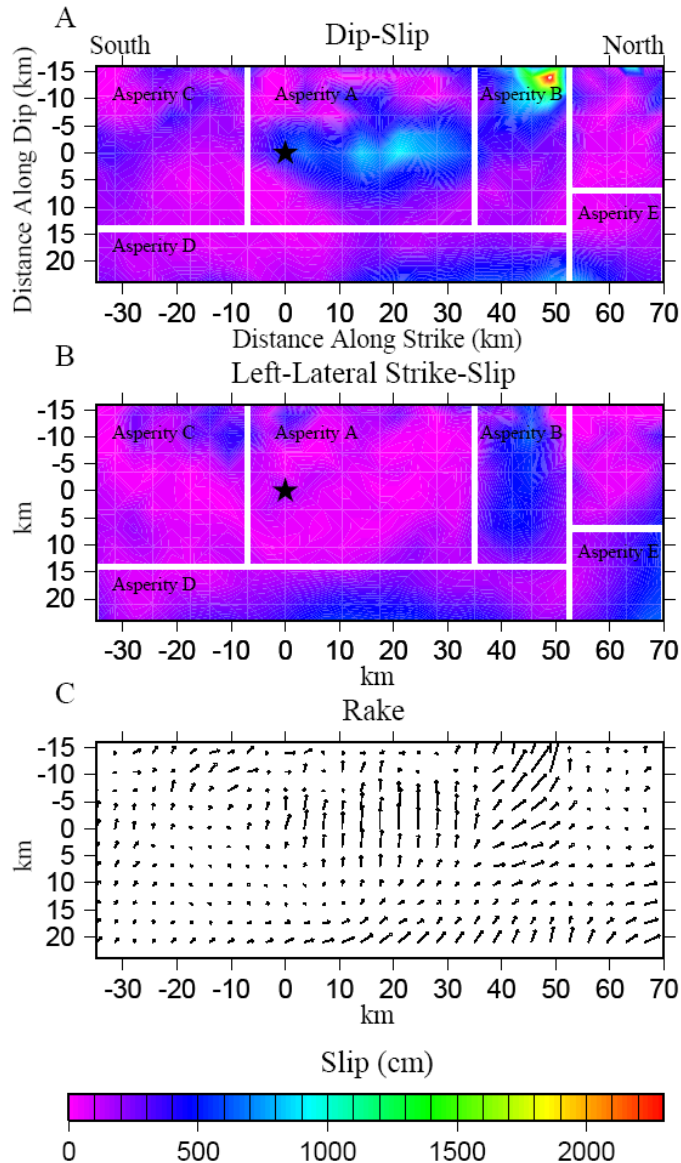
- ❑ **Пространственно-временная структура функции подвижки в очаге** представлена через сетку субисточников
- ❑ Каждый **субисточник случайным образом смещен** от узла правильной сетки (на 0.3-0.6 размера ячейки)
- ❑ **Времена вступлений и сейсмические моменты субочагов** определяются обобщенной моделью Хаскелла
- ❑ **Подвижки в субочагах** – случайные функции; временные серии не коррелированы между собой
- ❑ **Результирующая величина подвижки** варьирует по осям  $x$  и  $y$
- ❑ **Ориентация разломной плоскости, координаты и глубина гипоцентра, точка зарождения трещины, скорость вспарывания** определяются по результатам инверсий



# Расположение станций на скальных и осадочных породах в приразломных зонах землетрясения Чи-Чи 21 сентября 1999 г. (Тайвань) М ~ 7.6



Finite Source Modeling of the **1999 Taiwan (Chi-Chi) Earthquake** Derived from a Dense Strong Motion Network Data Set **W.-C. Chi, D. Dreger, A. Kaverina, Seism. Lab., Univ. California Berkeley** (BSSA, 2001, 91, no. 5)



По результатам инверсий:

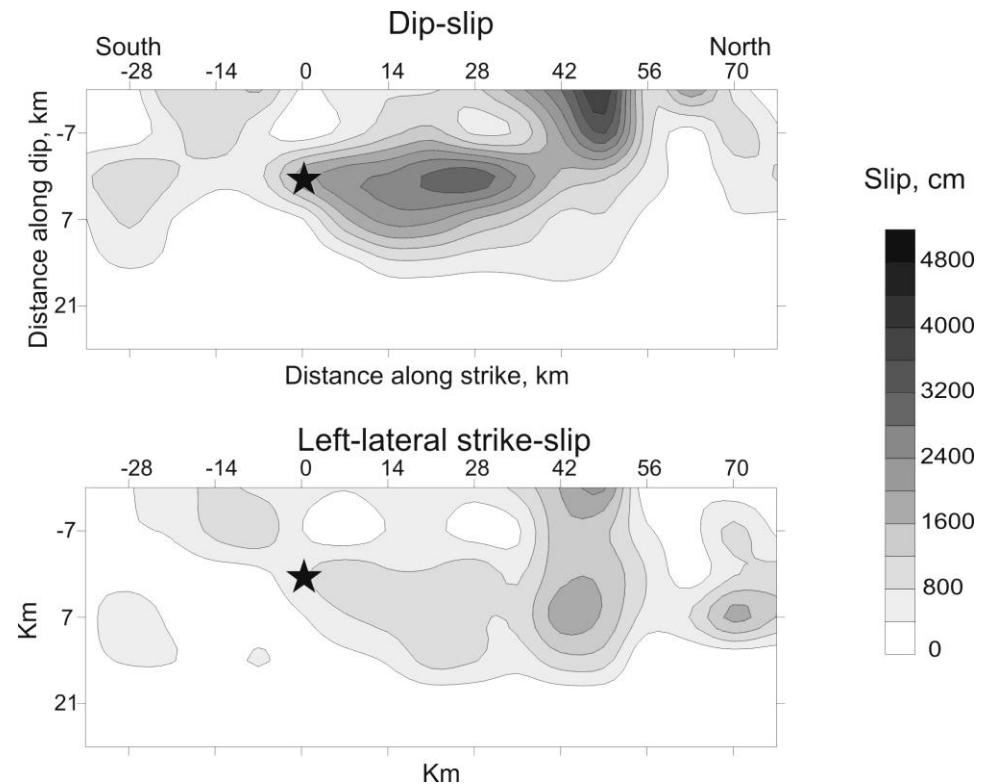
Простирание/падение разломной плоскости:  $5^\circ/30^\circ$

Размеры разломной плоскости: **119 км x 35 км**

Положение и глубина гипоцентра: **23.87, 120.84, 8.75 км**

Скорость распространения разрыва: **2.6 км/с**

В расчетах – 85 субочагов размером  $7 \times 7 \text{ км}^2$



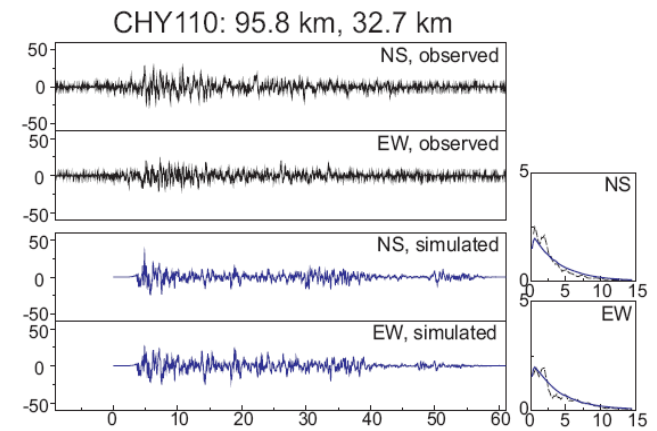
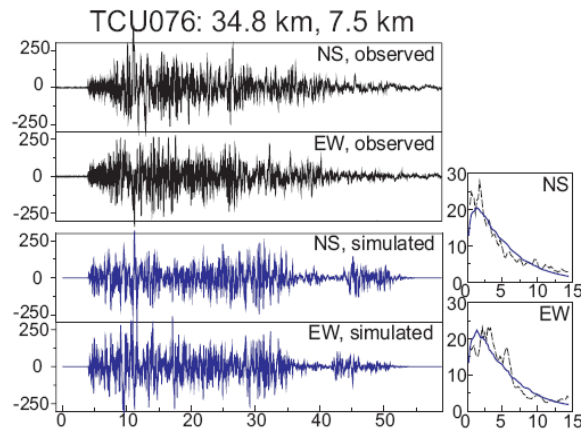
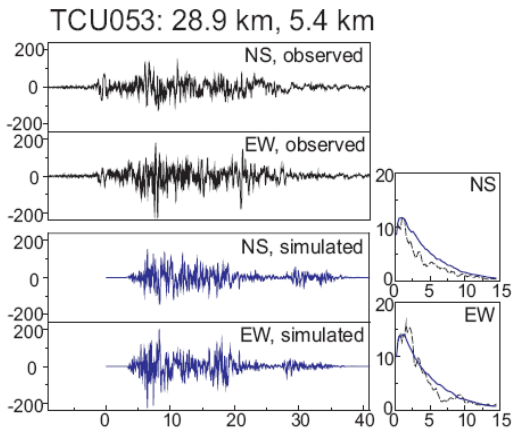
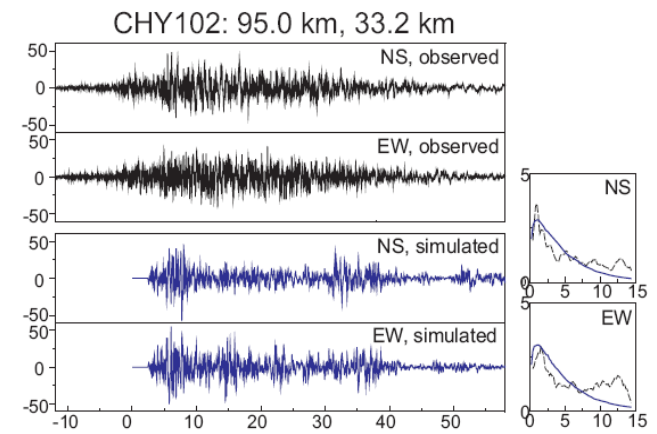
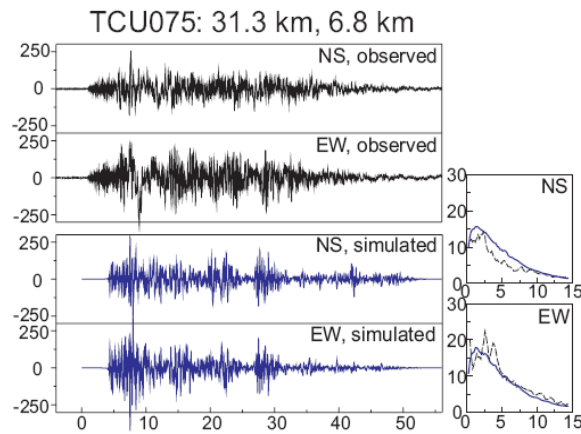
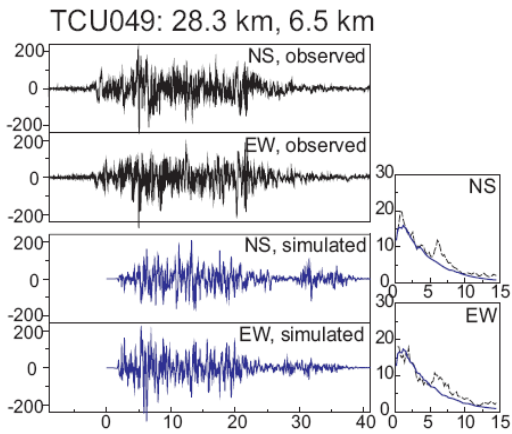
# Сравнение зарегистрированных и смоделированных акселерограмм на скальных станциях

относительно направления распространения трещины направление:

вперед

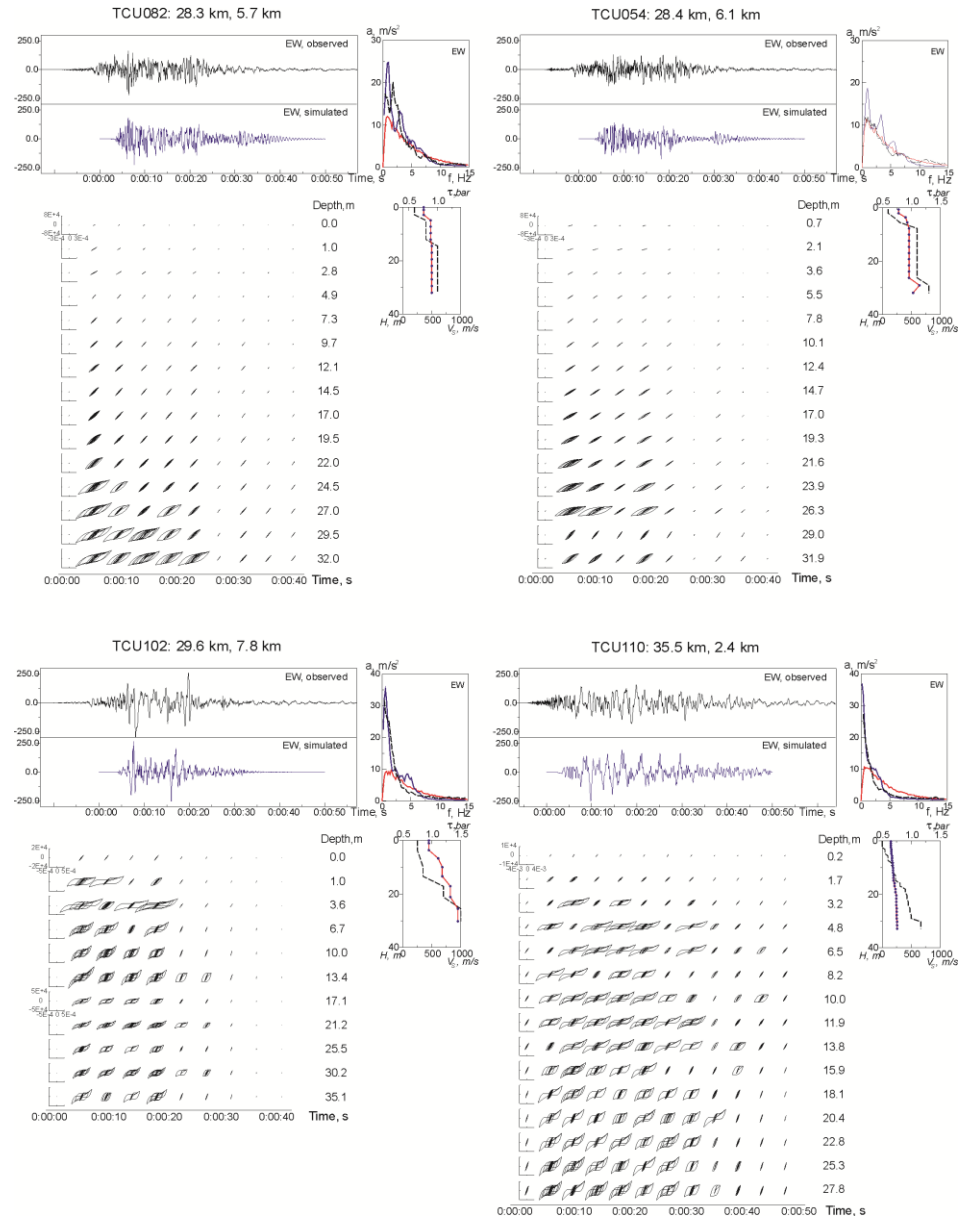
перпендикулярно

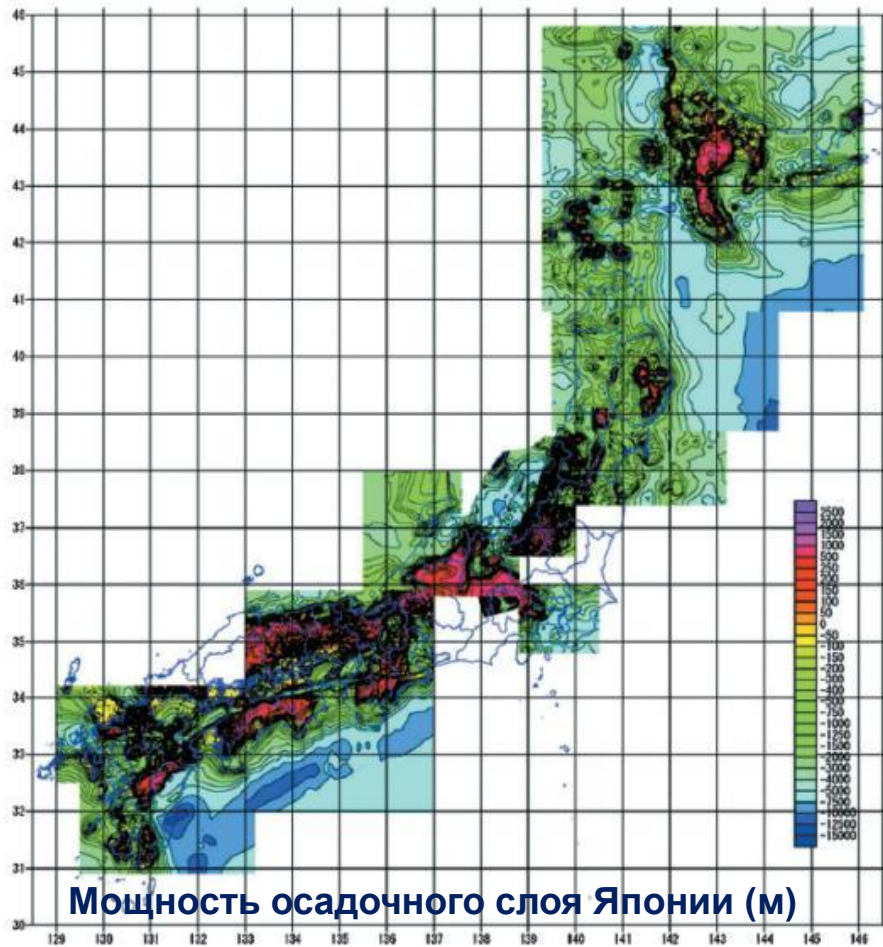
назад



## Получены характеристики очага и среды распространения сейсмических волн, по которым можно рассчитать колебания поверхности при будущих сильных землетрясениях

Ориентация разломной плоскости	5°/30°
Размеры разломной плоскости (км)	119 км x 35 км
Координаты гипоцентра (с.ш., в.д.)	23.8689, 120.84
Глубина гипоцентра (км)	8.75
Размер субочага (км)	7 × 7
Сброс напряжений $\Delta\sigma$ (бар)	50
Количество субочагов	85
$Q(f)$	$117 \cdot f^{0.77}$
Геометрическое расхождение	$1/r$ при $r < R_c$ км $1/R_c$ при $R_c \leq r < 150$ км
Карра $\kappa$ , (с)	0.07
Усиление в верхних слоях земной коры	Boore and Joyner (1997) western North America generic rock site; hard rock (Boore 2003)
Скорость S-волн в земной коре (км/с)	3.2
Скорость распространения трещины в очаге (км/с)	2.6
Плотность земной коры ( $\text{г/см}^3$ )	2.6

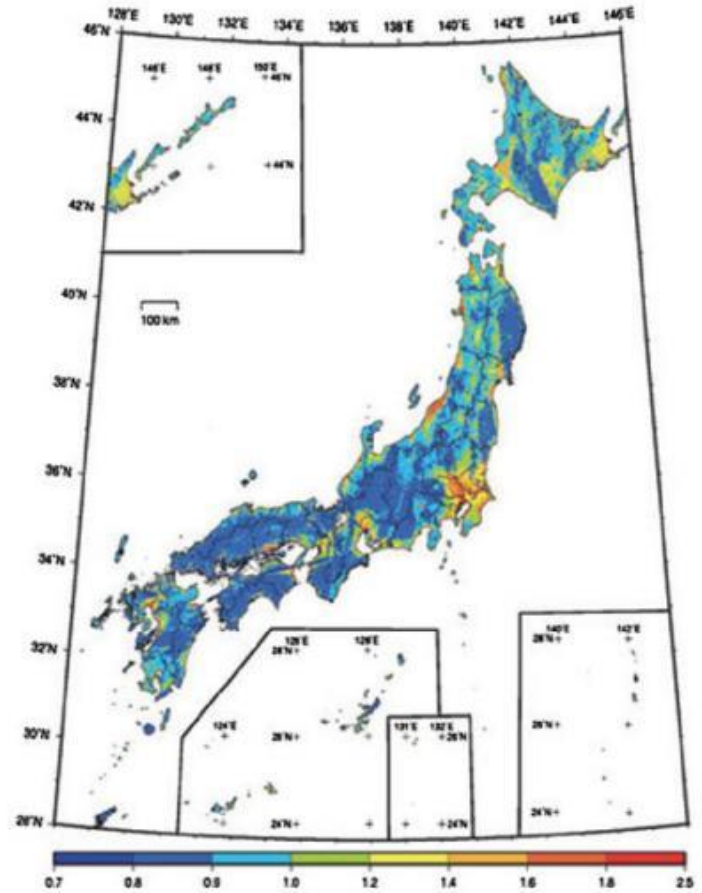




**Мощность осадочного слоя Японии (м)**

Для расчета сильных движений нужны:

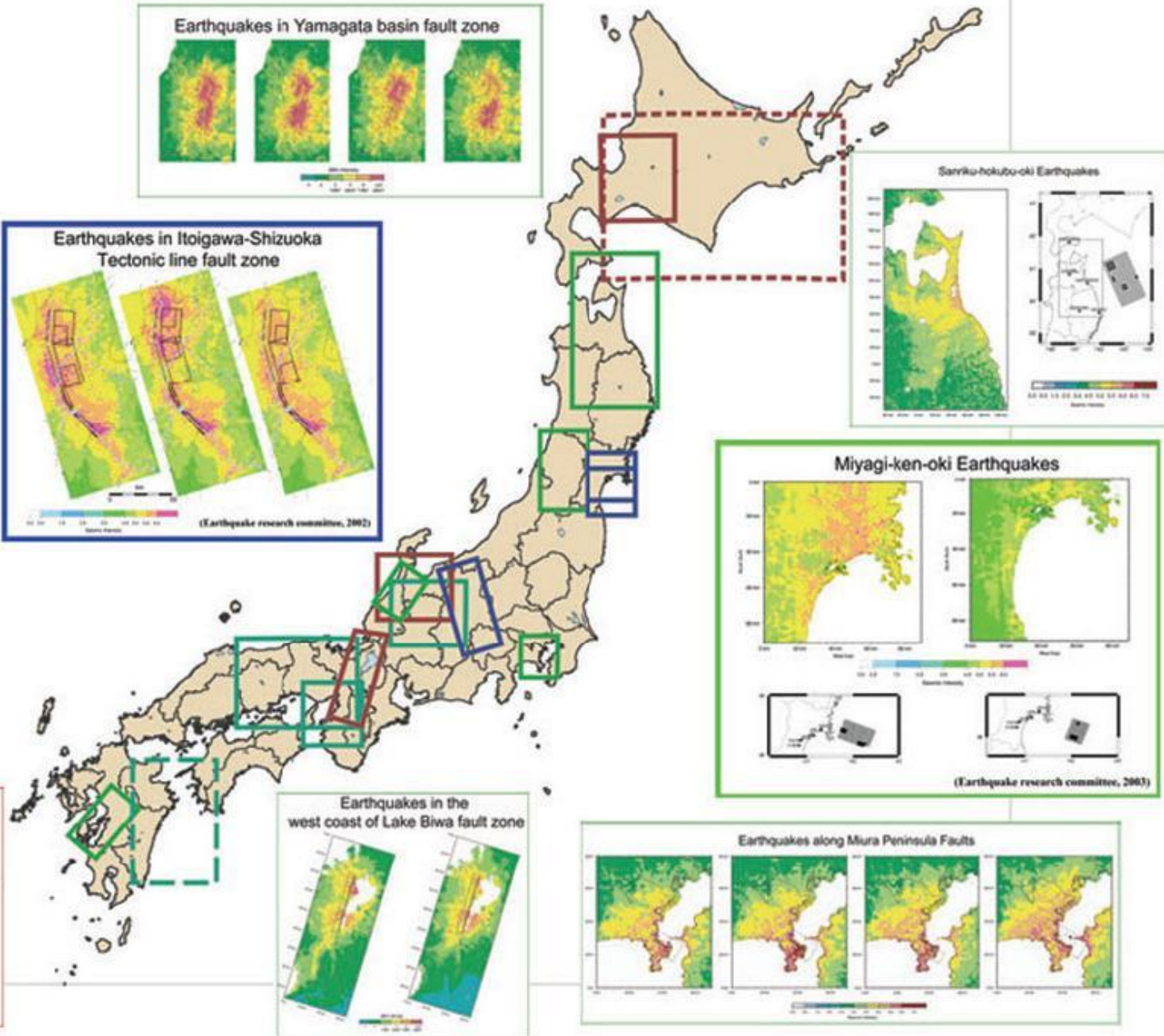
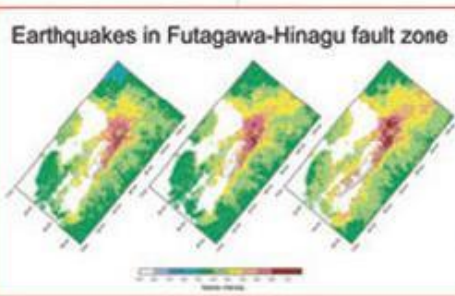
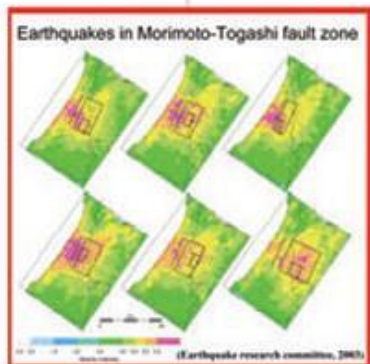
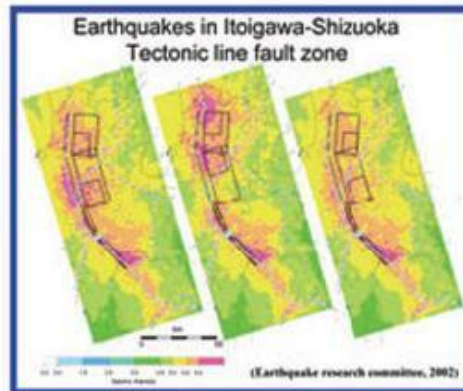
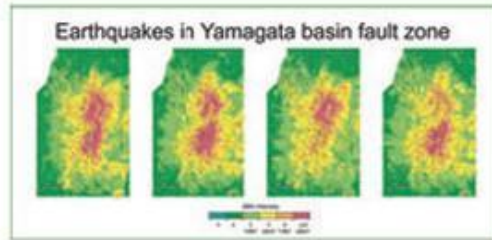
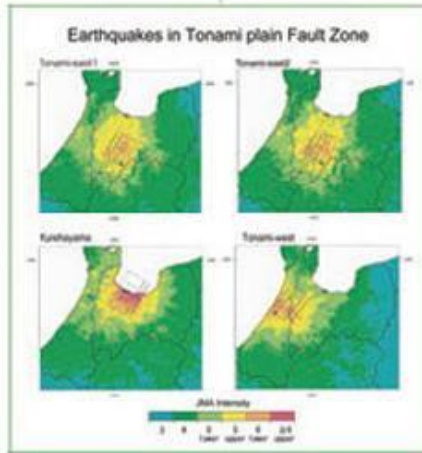
- модель затухания
- глубинная скоростная структура от нижней границы земной коры или литосферной плиты до сейсмического фундамента ( $V_S=3$  км/с) – **получена томографией для всей Японии**
- структура осадочного слоя от сейсмического фундамента до инженерного фундамента ( $V_S=400-700$  м/с) – **построена 3-мерная структурная модель для всей Японии**
- строение приповерхностного грунта от инженерного фундамента до поверхности – по сетке с шагом 1 км оценивается коэффициент усиления грунта – по данным о средней  $V_S$  в верхних 30 м)



**Коэффициенты усиления в грунтах по данным поверхностной геологии и геоморфологии**

# Япония: Рассчитываются сильные движения при сценарных землетрясениях (SESM)

(интенсивность по шкале JMA от 3 -зеленый цвет- до 6+ или 7 -красный цвет)





## Крупнейшие и наиболее разрушительные землетрясения 2000-2015 гг.

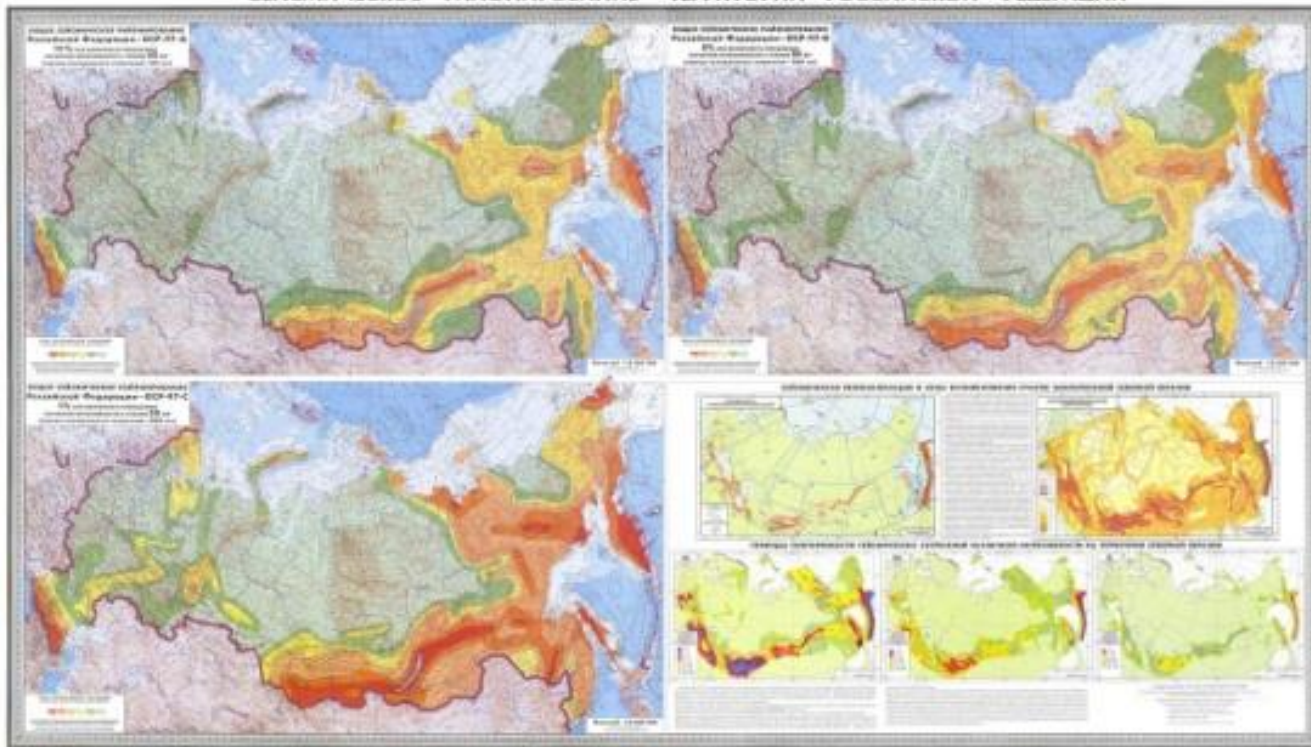
Год	Дата	Магнитуда	Число жертв	Регион
2000	4 июня	7.9	103	Суматра, Индонезия
2000	16 ноября	8.0	2	Папуа, Новая Гвинея
2001	26 января	<b>7.7</b>	<b>20 023</b>	<b>Индия</b>
2001	23 июня	8.4	138	Побережье Перу
2002	25 марта	<b>6.1</b>	<b>1 000</b>	<b>Гиндукуш, Афганистан</b>
2002	3 ноября	<b>7.9</b>	<b>0</b>	<b>Центральная Аляска</b>
2003	25 сентября	<b>8.3</b>	<b>0</b>	<b>Хоккайдо, Япония</b>
2003	26 декабря	<b>6.6</b>	<b>31 000</b>	<b>Иран</b>
2004	26 декабря	<b>9.1</b>	<b>227 898</b>	<b>Суматра, Индонезия</b>
2005	28 марта	8.6	1 313	Суматра, Индонезия
2005	8 октября	<b>7.6</b>	<b>80 361</b>	<b>Пакистан</b>
2006	26 мая	<b>6.3</b>	<b>5 749</b>	<b>Ява, Индонезия</b>
2006	15 ноября	8.3	0	Курильские острова
2007	15 августа	8.0	514	Побережье Перу
2007	12 сентября	8.5	25	Суматра, Индонезия
2008	12 мая	<b>7.9</b>	<b>87 587</b>	<b>Сычуань, Китай</b>
2009	29 сентября	8.1	192	Самоа, Полинезия
2010	1 января	<b>7.0</b>	<b>316 000</b>	<b>Гаити</b>
2010	27 февраля	8.8	507	Чили
2011	22 февраля	6.3	75	Новая Зеландия
2011	11 марта	<b>9.0</b>	<b>20 896</b>	<b>Япония</b>
2012	6 февраля	6.7	113	Филиппины
2012	11 апреля	8.6	0	Побережье Суматры
2013	24 мая	8.3	0	Охотское море
2013	24 сентября	7.7	825	Пакистан
2014	1 апреля	8.2	6	Чили
2014	3 августа	<b>6.2</b>	<b>729</b>	<b>Венпинг, Китай</b>
2015	25 апреля	<b>7.8</b>	<b>9 018</b>	<b>Непал</b>

**Валентин Иванович  
Уломов**



**Александр  
Александрович Гусев**

**СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

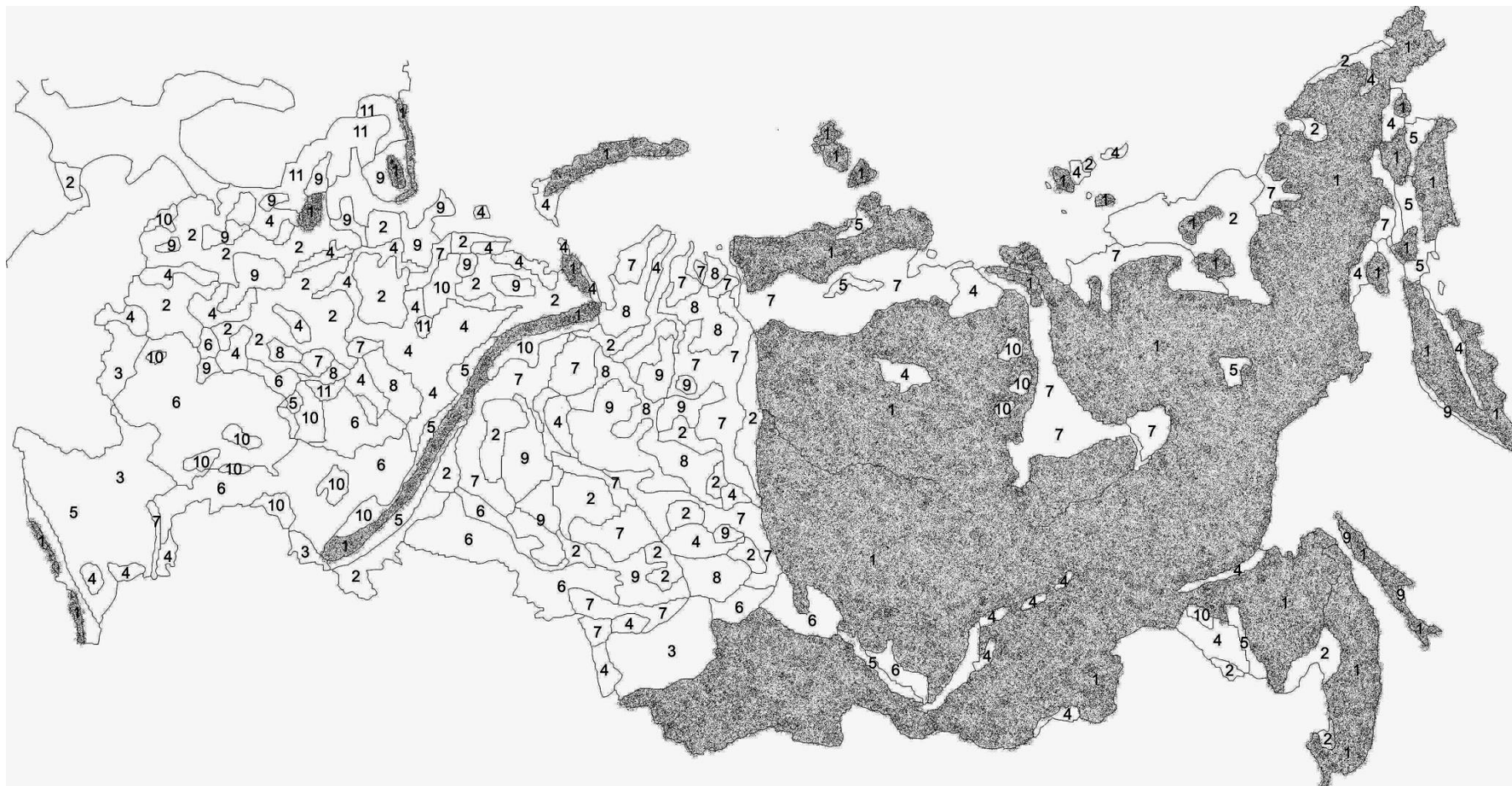


**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр



**НИИОСП**  
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА

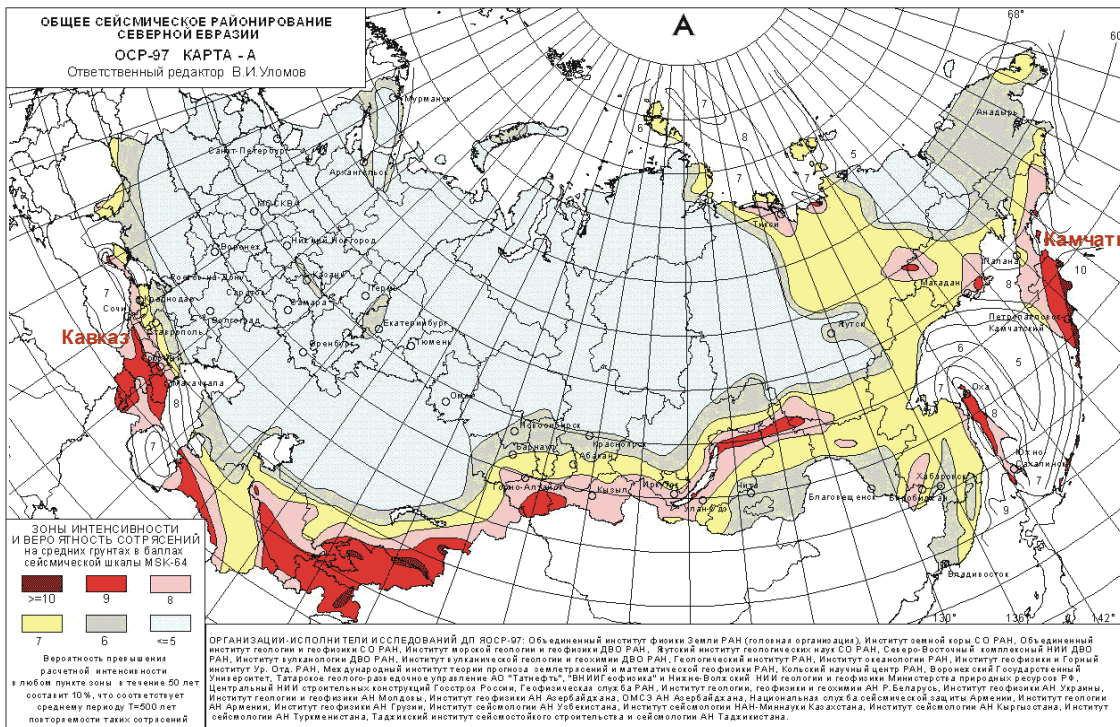
**Скальные грунты занимают пространства Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. В европейской части имеют ограниченное распространение на Большом Кавказе, в осевой части Урала, на востоке Кольского полуострова**



**11 типов наиболее представительных по площади развития грунтов:**

**1 – преимущественно скальные, 2 – глинистые, 3 – лессовые, 4 – песчаные, 5 – глинистые с обломочным материалом, 6 – глинистые с лессовым слоем в ВЧР, 7 – песчано-глинистые с преобладанием глинистых в ВЧР, 8 – песчано-глинистые с преобладанием песчаных в ВЧР, 9 – торфяные подстилаемые грунтами разного состава, 10 – глинистые подстилаемые скальными, 11 – песчаные, подстилаемые скальными**

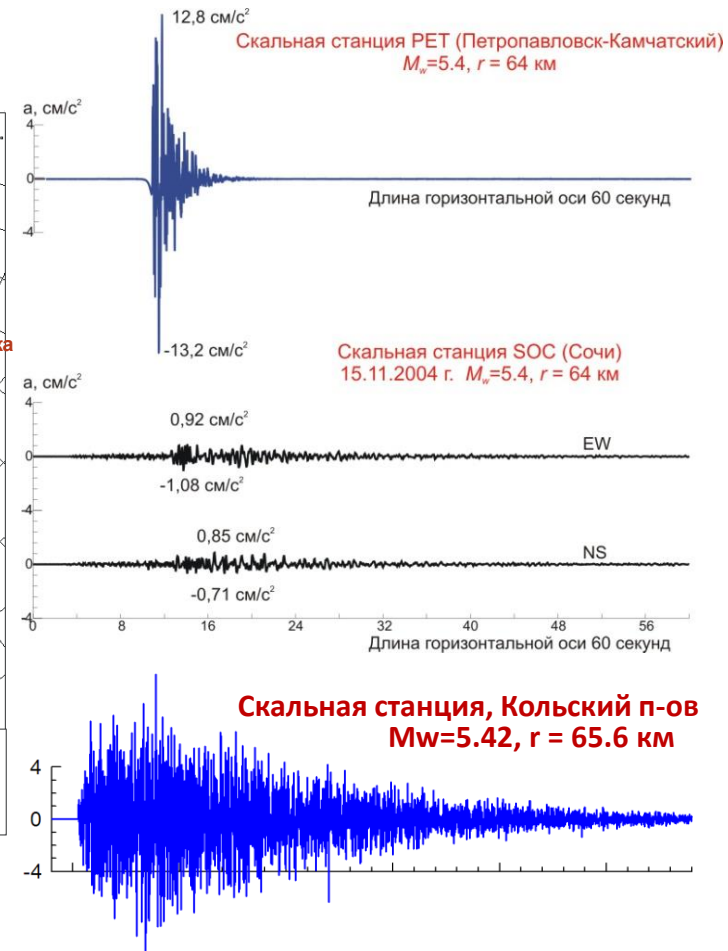
# Различия региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на территории России



Доклады АН, 2011, 438, 5, 687-693

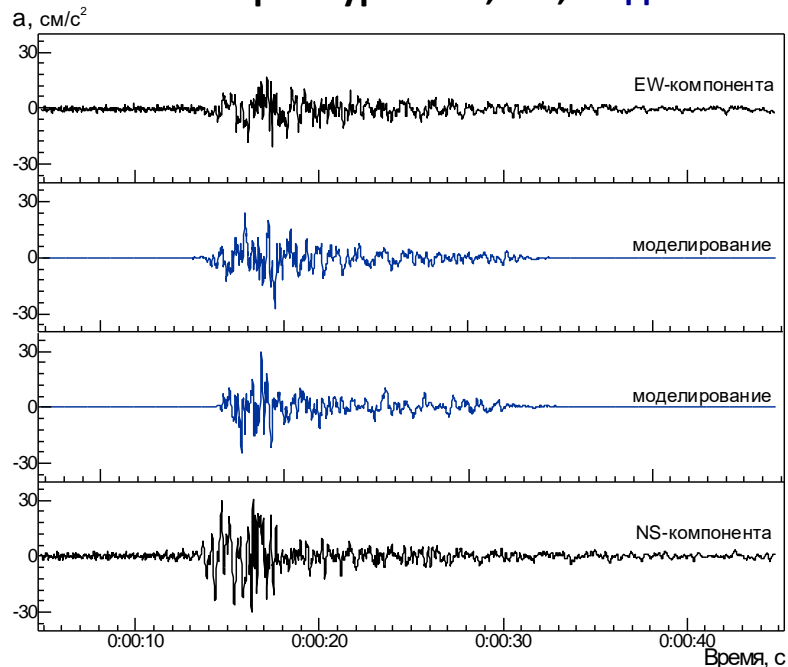
Пиковые ускорения (PGA) при фиксированных магнитуде и расстоянии  $M$  и  $R$  сильно различаются от региона к региону (субдукционные и коровые землетрясения):

**Камчатка – Кавказ – в 10-15 раз**



# Акселерограммы землетрясения 13.11. 1993 на ст.

**PET** и спектры Фурье: **NS, EW, модель**



# Курило-Камчатская зона (субдукционные землетрясения)

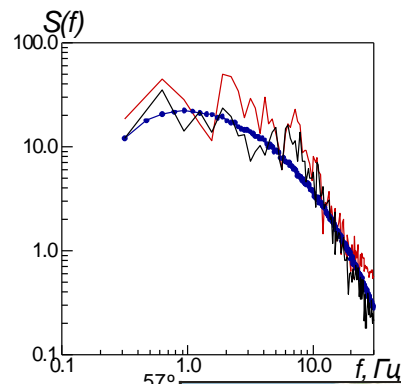
## Землетрясения 1992-1993 гг.

**2.03.1992** ( $M_w = 6.8$ ,  $h = 50.2$  км)

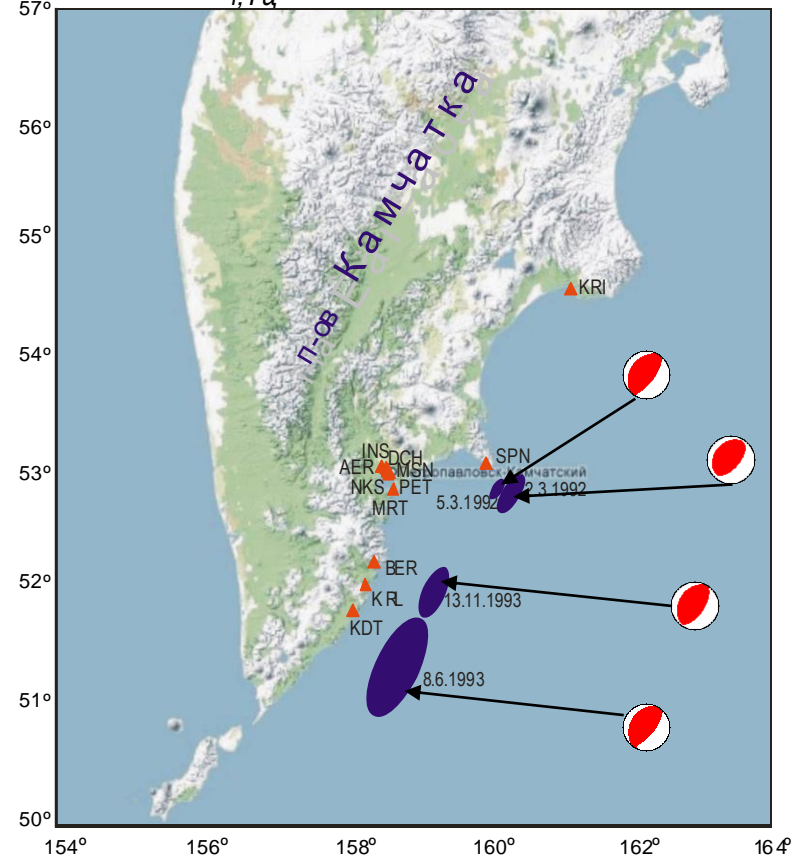
**5.03.1992** ( $M_w = 6.3$ ,  $h = 52$  км)

**8.06.1993** ( $M_w = 7.5$ ,  $h = 45.9$  км)

**13.11.1993** ( $M_w = 7.0$ ,  $h = 54.2$  км)

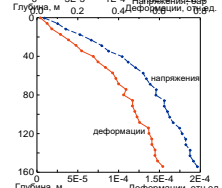
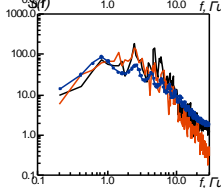
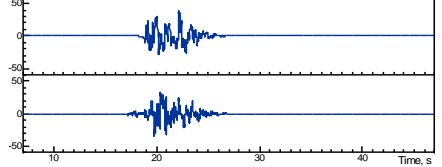
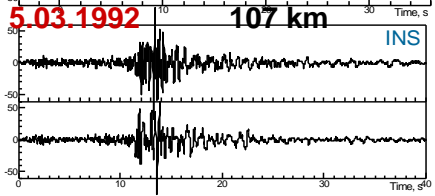
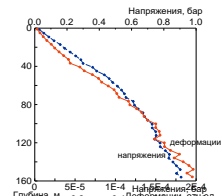
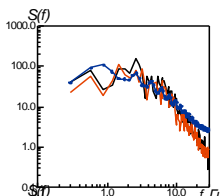
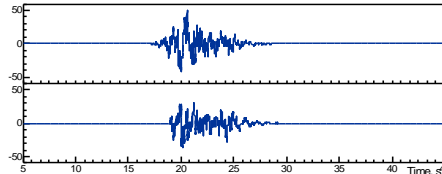
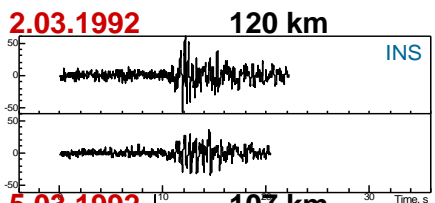
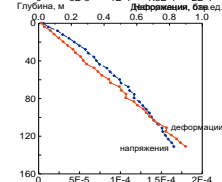
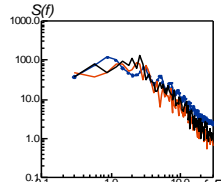
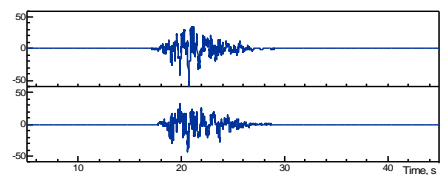
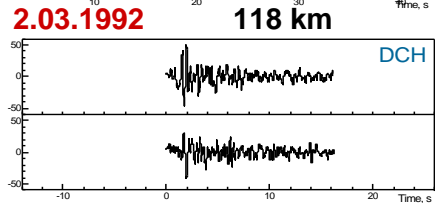
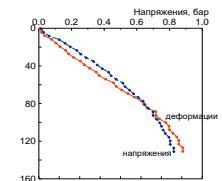
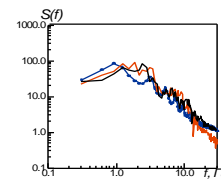
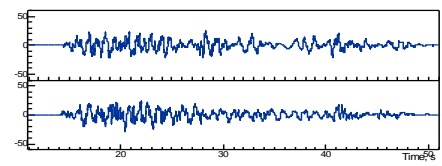
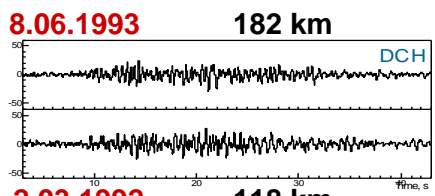
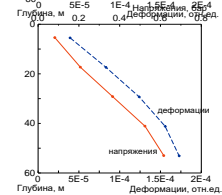
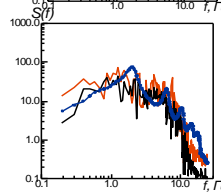
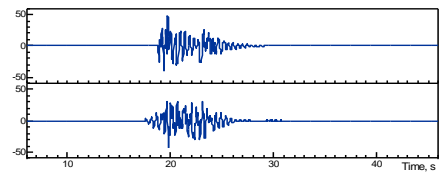
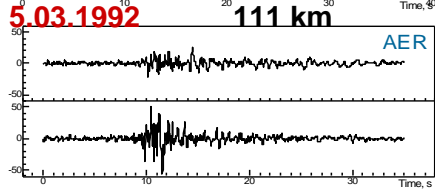
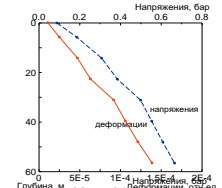
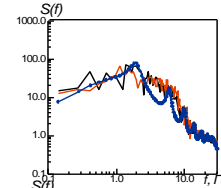
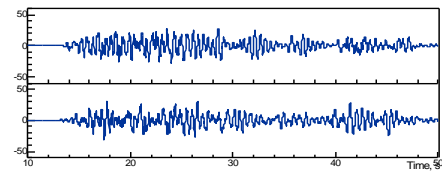
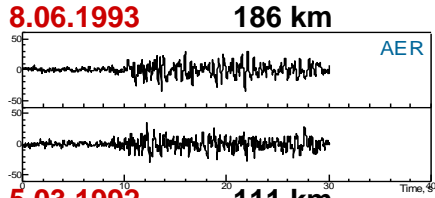


Координаты и глубина эпицентра	52.0° с.ш., 159.27° в.д., 54.2 км
Размеры разломной плоскости	90 км x 30 км
Ориентация разломной плоскости	азимут 206°, падение 31°
Параметр напряжения $\Delta\sigma$	100 бар
Локальное усиление в коре $A(f)$	$\sim 2-2.5$ на $f \sim 10-20$ Гц
$Q(f)$	$180 \cdot f^{0.7}$
Параметр каппа $\kappa$	$\sim 0,06$ с
Геометрическое расхождение	$1/R$ при $R < 250$ км
$V_s$ и плотность в окрестности очага	4.3 км/с 3.3 г/см <sup>3</sup>

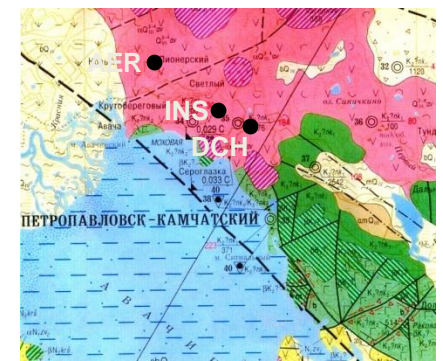


# “Грунтовые” станции AER, DCH, INS

	Выс у.м.	мощность	$V_s, \text{m/s}$
AER	80 m	65 m	1000
DCH	150 m	135 m	1000
INS	175 m	160 m	1400



Пирокластические породы покрыли половину территории современного Петропавловска-Камчатского слоем 100-200-м после 2-х катастрофических извержений взрывного типа Правячинского вулкана 30000-45000 лет назад (Мелекесцев и др. 1991).



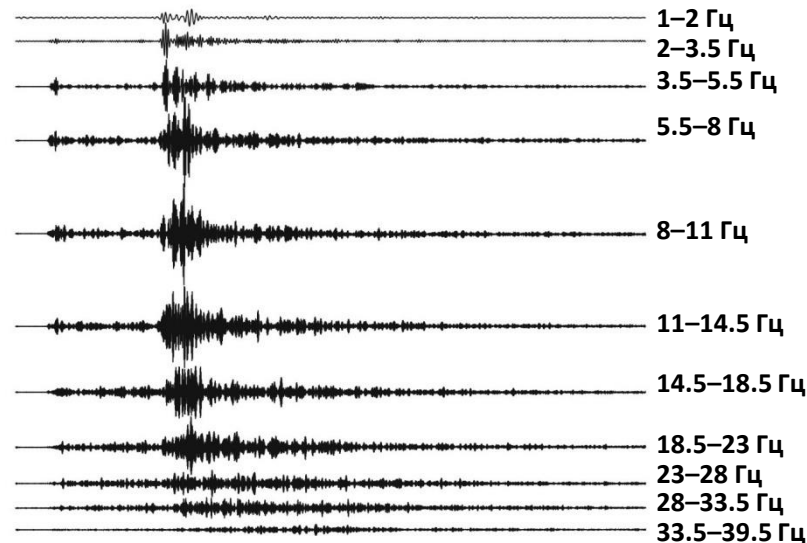
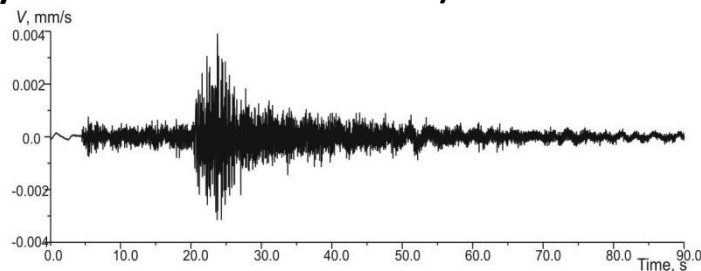
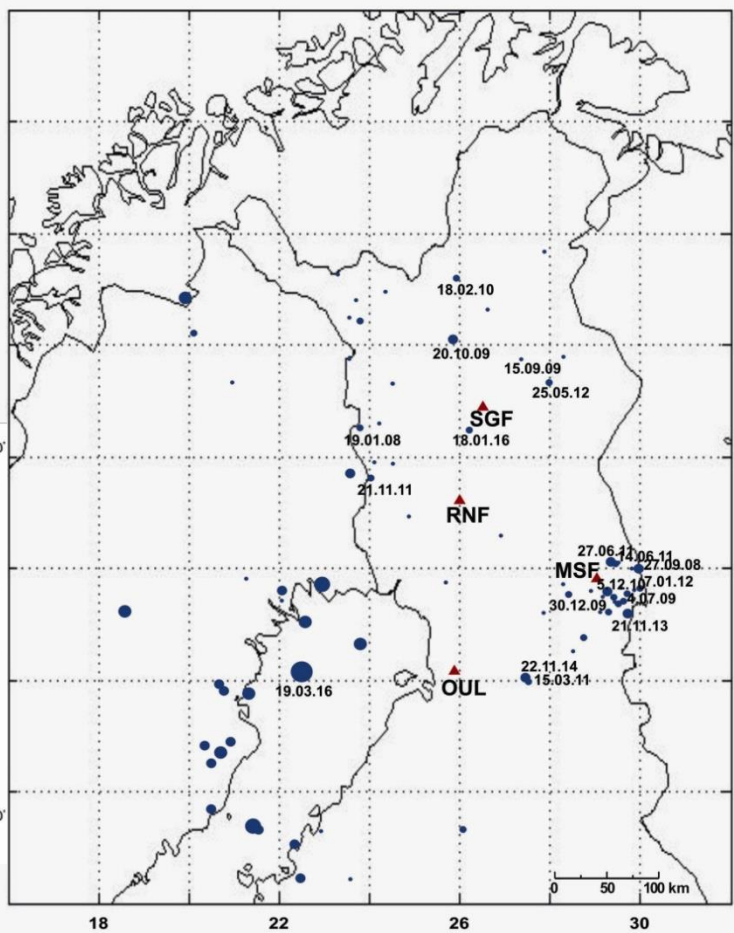
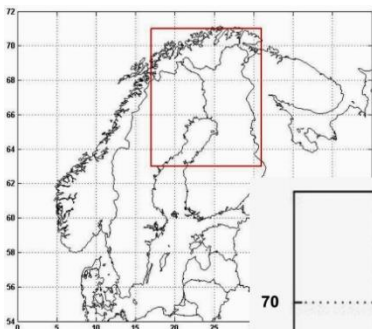
Происхождение грунтов объясняет их однородность

# Кольский полуостров и Карелия (сейсмичность стабильных континентальных плит)

Характеристики излучения и распространения сейсмических волн оцениваются по записям местных землетрясений

С 2007 г. станциями Северной Финляндии зарегистрировано ~80 землетрясений с  $M_w \sim 1.5 - 4.1$  и с глубинами очагов  $h \sim 0-25$  км)

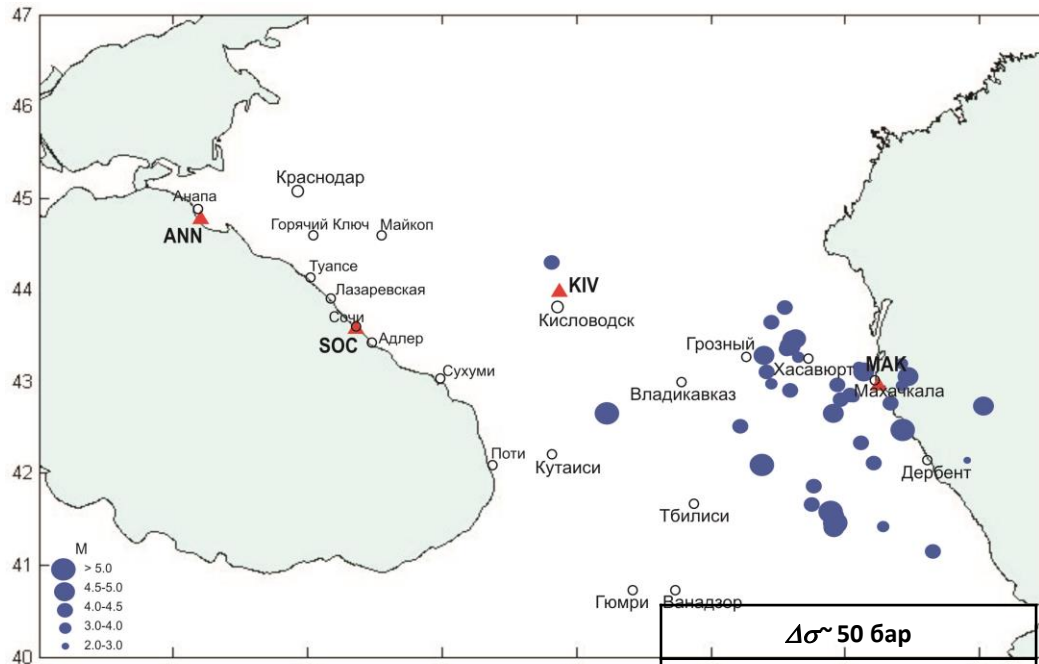
## Сейсмическая сеть Финляндии



Велосиграмма землетрясения  
30.12.2009  $M=2.2$  ст. OUL  $r = 137.5$  км  
и результаты ее полосовой фильтрации

# Северный Кавказ (коровые землетрясения)

## Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн



$\Delta\sigma \sim 50$  бар

$1/R$  при  $R < 50$  км  
 $1/50$  при  $50 \leq R < 150$  км  
 $1/R^{0.5}$  при  $R > 150$  км

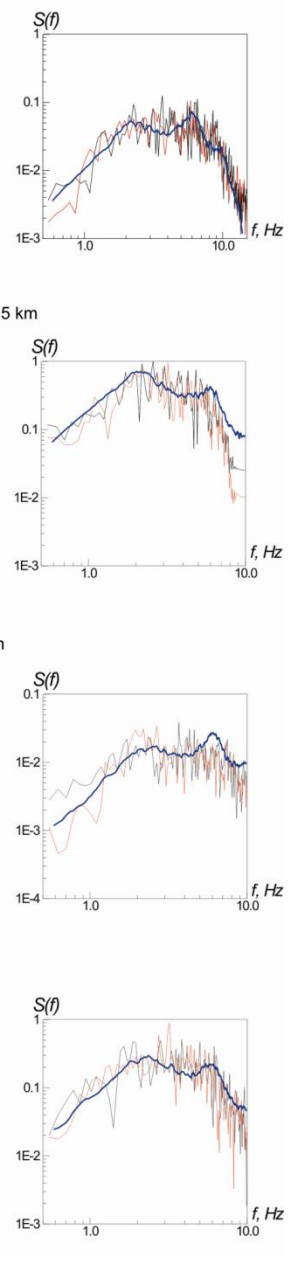
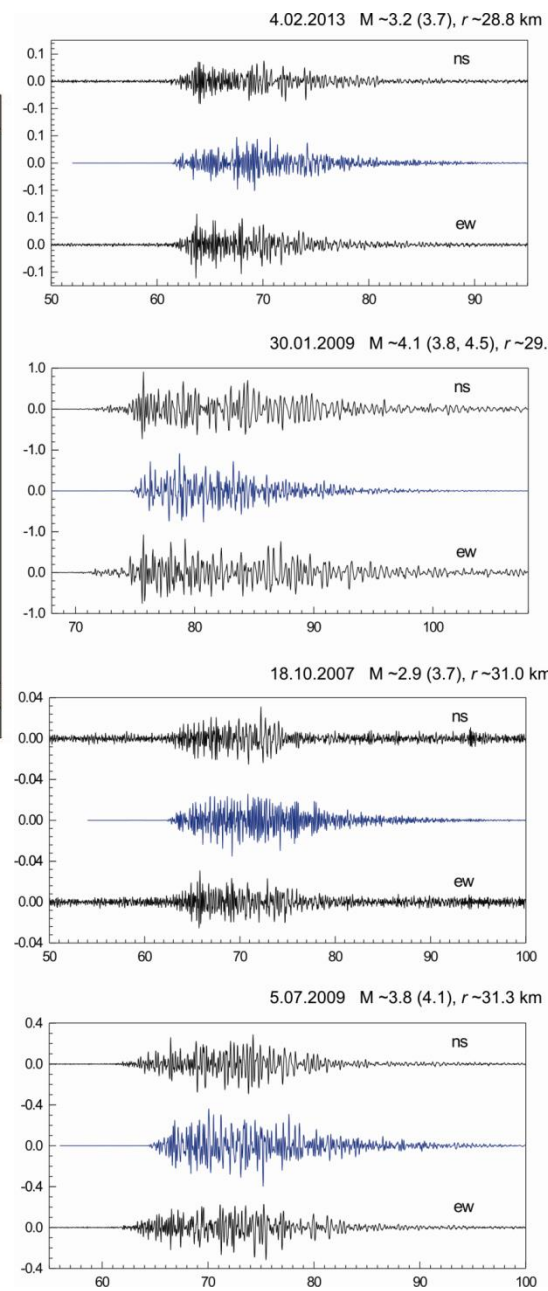
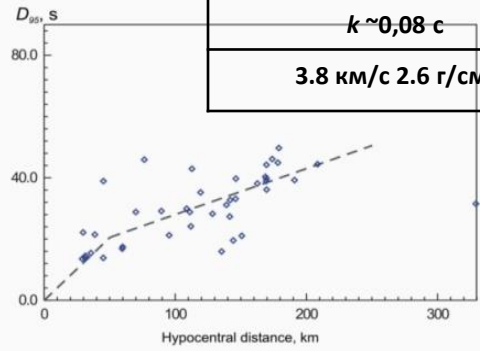
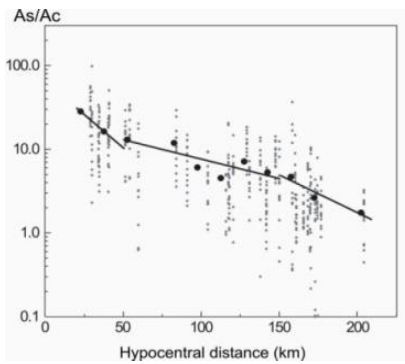
$Q(f) \sim 100 \cdot f^{0.9}$

$A(f) \sim 1.0$

$k \sim 0,08$  с

$3.8$  км/с  $2.6$  г/см<sup>3</sup>

### Восточная часть:

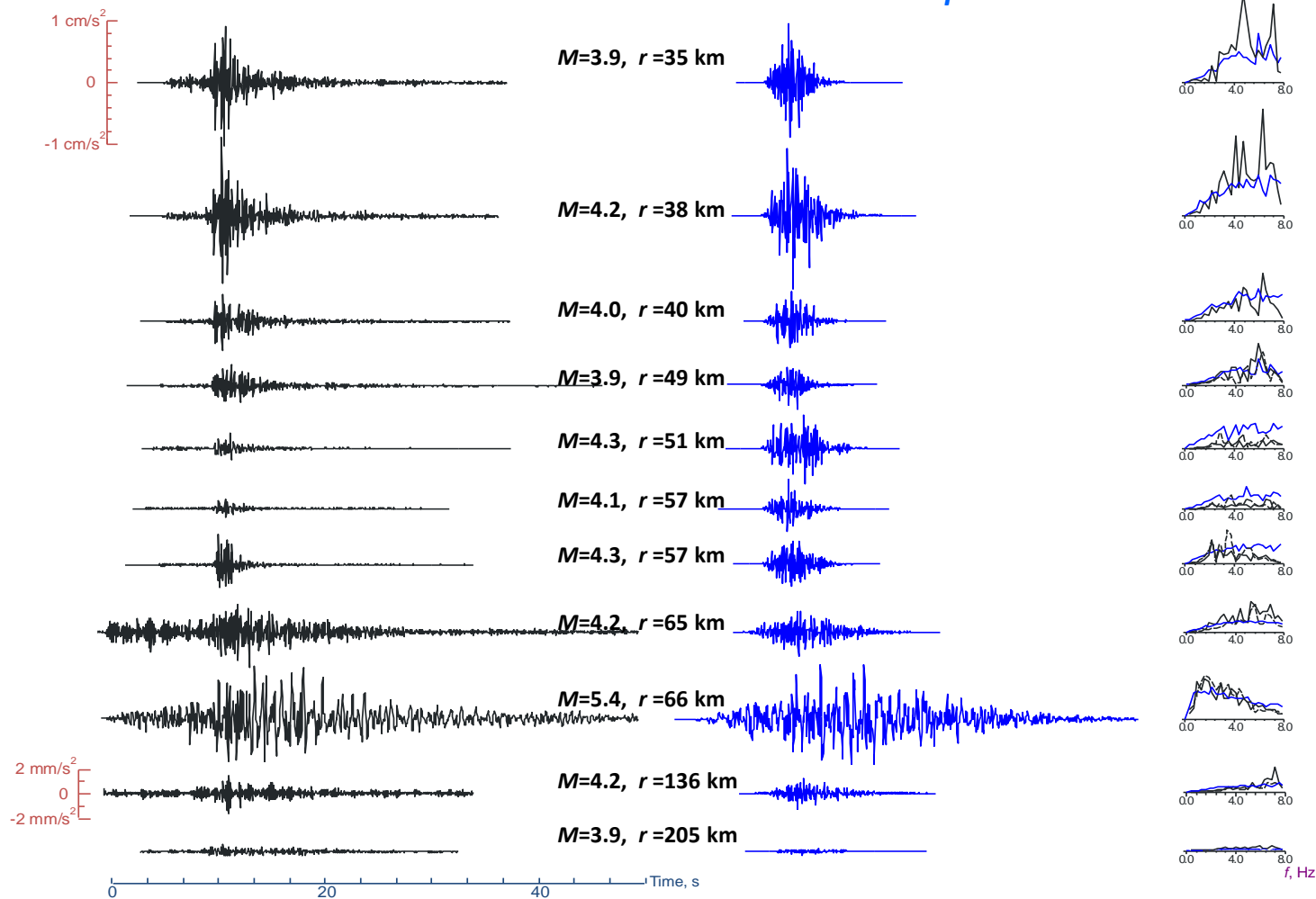




## Зона I: окрестности г. Сочи ( $r > 35$ км)

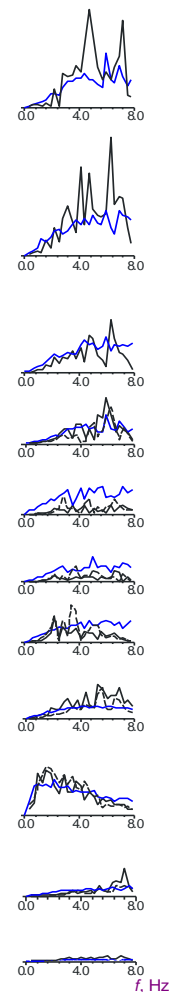
**наблюдения**

**моделирование**



**Западная часть:**

$\Delta\sigma \sim 50$ бар
$1/R$ при $R < 50$ км $1/50$ при $50 \leq R < 150$ км $1/R^{0.5}$ при $R > 150$ км
$Q(f) \sim 55 \cdot f^{0.9}$
$A(f) \sim 1.0$
$\kappa \sim 0,03$ с
$3.5 \text{ км/с } 2.7 \text{ г/см}^3$



Оценивание локального усиления, параметра карра  $\kappa$ , длительности, формы окна

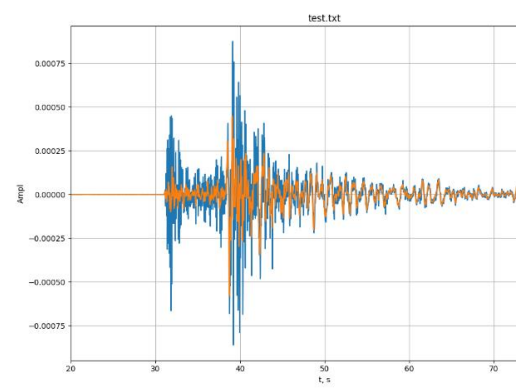
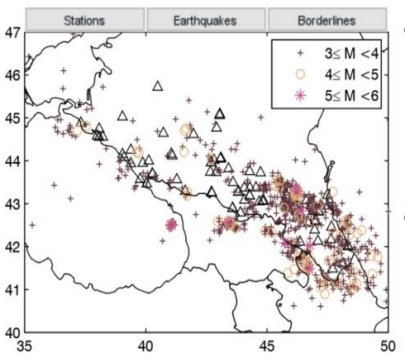
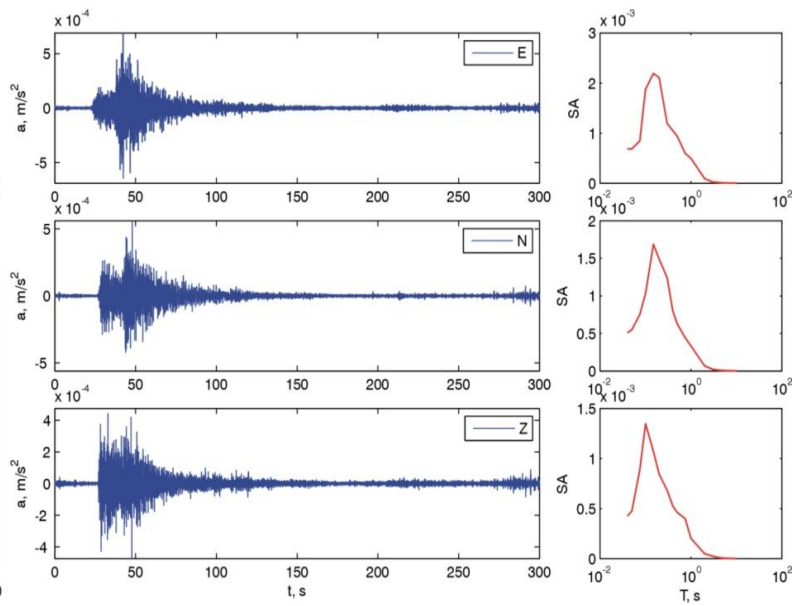
# Система управления базой данных по сильным движениям СУБД

Первичная обработка 3-компонентных записей землетрясений для удаления аппаратных искажений, шумов и определения полосы частот полезного сигнала

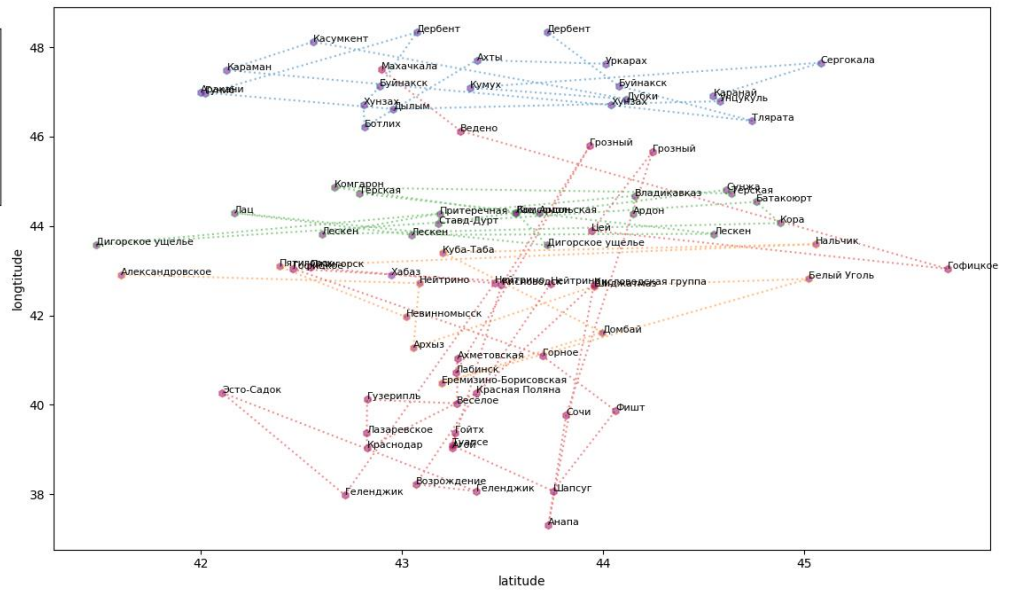
Преобразование «сырых» записей к формату базы данных спектров реакции, с набором характеристик: магнитуд, расстояний и др. для построения уравнений прогноза движений грунта (УПДГ)

Records	
28	20050824-165753_RU.LAC.00.SHZ
29	20050824-165758_RU.PRT.00.SLE
30	20050824-165800_RU.PRT.00.SLZ
31	20050824-165801_RU.DIG.00.SHN
32	20050824-165801_RU.PRT.00.SLN
33	20050824-165803_RU.AD2.00.SHN
34	20050824-165803_RU.AD2.00.SHZ
35	20050824-165804_RU.DIG.00.SHE
36	20050824-165805_RU.KSM.00.SHE
37	20050824-165806_RU.DIG.00.SHZ
38	20050824-165807_RU.AD2.00.SHE
39	20051222-040407_RU.VLK.00.BLN
40	20051222-040408_RU.VLK.00.BLZ
41	20051222-040414_RU.DIG.00.SHZ
42	20051222-040418_RU.VLK.00.BHN
43	20051222-040418_RU.AD2.00.SLE
44	20051222-040418_RU.DIG.00.SHN
45	20051222-040418_RU.LAC.00.SHE
46	20051222-040419_RU.BTK.00.SHT
47	20051222-040419_RU.PRT.00.SLZ

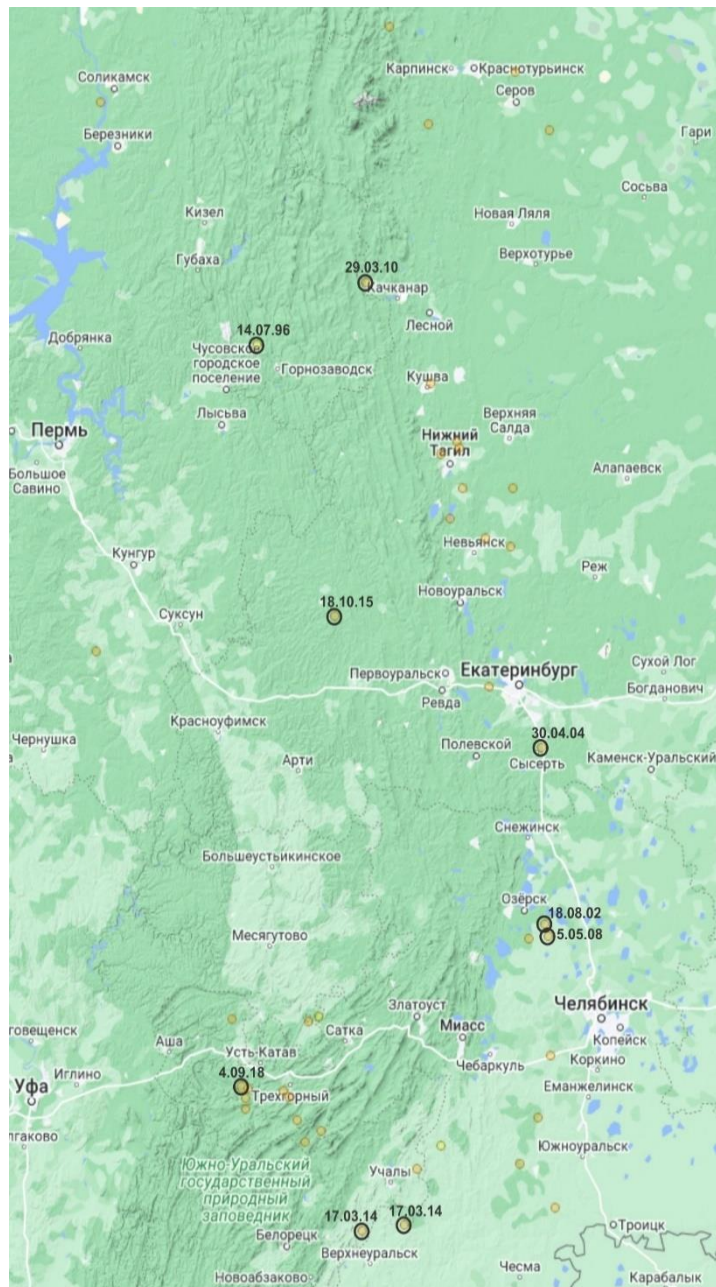
Connect DB	Print to DB	Close DB	
2005-08-24	165809	Lat = 42.90	Lon = 45.70
Depth = 39.0 км	Mag = 4.2	Repi = 119.99 км	Rhyp = 126.30 км
Грунт: Лессовидный суглинок, глина			



- ⊠ DAGSR
- ⊠ KMGSR
- ⊠ NOGSR
- ⊠ OBGSR
- ⊠ SSC

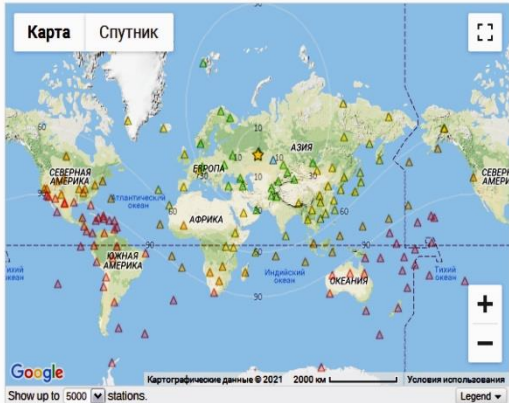


# Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в **Уральском регионе**, уточнение уравнений прогноза движений грунта



	Дата	Широта	Долгота	$h$ , км	$r_h$ , гр.	$m_b(M_w)$	$r_h$ , км
<b>1</b>	<b>4.09.2018</b>	<b>54.8088</b>	<b>57.9818</b>	<b>10</b>	<b>1.65</b>	<b>(5.0)</b>	<b>177.5</b>
2	28.05.1990	55.1451	58.6259	10	1.29	4.5(4.66)	137.9
3	28.05.1990	55.1695	58.7173	33	1.26	4.5(4.66)	139.1
4	15.11.2018	54.803	58.0397	10.0	1.6	4.4(4.6)	171.2
5	29.09.2018	54.7481	58.0138	10.0	1.69	4.4(4.6)	177.2
6	5.09.2018	54.6923	58.0189	10.0	1.76	4.2(4.4)	189.3
<b>7</b>	<b>18.10.2015</b>	<b>57.1839</b>	<b>58.8706</b>	<b>15.36</b>	<b>0.77</b>	<b>4.2(4.4)</b>	<b>84.2</b>
8	26.01.2014	57.9947	60.0716	3.7	1.77	3.7(4.0)	177.1
9	22.12.2013	57.965	59.9027	1.8	1.7	3.6(3.92)	192.0
10	25.10.2006	56.8357	60.3549	31.1	1.07	3.6(3.92)	122.1
11	29.09.2013	58.0245	60.0526	10.8	1.79	3.5(3.85)	202.2
12	30.09.2011	55.5691	60.7395	0	1.49	3.5(3.85)	164.0
13	2.10.2006	54.6368	58.5078	0	1.79	3.4(3.78)	191.8
14	6.08.2006	57.5604	60.3273	0	1.48	3.4(3.78)	164.5
15	2.07.2006	57.8024	60.5901	0	1.76	3.4(3.78)	191.3
16	27.03.2012	54.9724	60.9562	0	1.99	3.3(3.71)	216.6
17	7.07.2004	54.7565	58.4347	10	1.68	3.3(3.71)	179.5
18	2.10.2006	54.5208	58.5916	0	1.91	3.2(3.64)	204.2
19	16.12.2008	57.0124	56.5826	0	1.23	3.1(3.57)	136.1
20	3.10.2006	54.5756	58.7461	0	1.86	3.1(3.57)	198.7
<b>21</b>	<b>5.05.2008</b>	<b>55.5824</b>	<b>60.9329</b>	<b>0</b>	<b>1.57</b>	<b>3.0(3.5)</b>	<b>173.3</b>
22	4.07.2006	54.7853	58.3791	10	1.65	3.0(3.5)	176.6
23	15.01.2006	57.6568	59.9881	0	1.45	3.0(3.5)	157.1
<b>24</b>	<b>18.08.2002</b>	<b>55.644</b>	<b>60.902</b>	<b>10</b>	<b>1.53</b>	<b>3.0(3.5)</b>	<b>168.5</b>
25	7.06.2022	54.4047	60.6501	10	2.36	4.5(4.66)	256.2
<b>26</b>	<b>29.03.2010</b>	<b>58.7769</b>	<b>59.1708</b>	<b>7.5</b>	<b>2.37</b>	<b>3.6(3.92)</b>	<b>253.6</b>
<b>27</b>	<b>17.03.2014</b>	<b>54.0509</b>	<b>59.1368</b>	<b>0</b>	<b>2.4</b>	<b>3.5(3.85)</b>	<b>257.1</b>
28	24.08.2012	54.1749	60.9928	0	2.64	3.4(3.78)	286.3
29	7.07.2004	54.5	59.9	33.0	2.07	3.4(3.78)	225.5
<b>30</b>	<b>14.07.1996</b>	<b>58.4858</b>	<b>58.1295</b>	<b>33.0</b>	<b>2.07</b>	<b>M13.4(3.83)</b>	<b>223.8</b>
<b>31</b>	<b>17.03.2014</b>	<b>54.0841</b>	<b>59.5485</b>	<b>0</b>	<b>2.71</b>	<b>3.2(3.64)</b>	<b>258.6</b>
32	3.09.2011	54.6497	60.8322	0	2.9	3.2(3.64)	238.2
33	4.11.2005	57.5189	60.5675	0	1.54	mpv3.2	168.5
34	19.01.2015	58.3026	59.7945	0	1.99	M13(3.6)	213.5
35	5.06.2005	57.8045	60.1017	0	1.61	mpv3	174.0
<b>36</b>	<b>30.04.2004</b>	<b>56.5369</b>	<b>60.861</b>	<b>17.1</b>	<b>1.27</b>	<b>mpv3</b>	<b>142.9</b>
37	29.01.2004	55.1616	57.884	27.3	1.32	mpv3	144.8

The map below shows stations operational during this event, filtered by the criteria in the form to the right.



**Request Only**

Networks:

Channels:

Distance Range:  -

Azimuth Range:  -   Invert

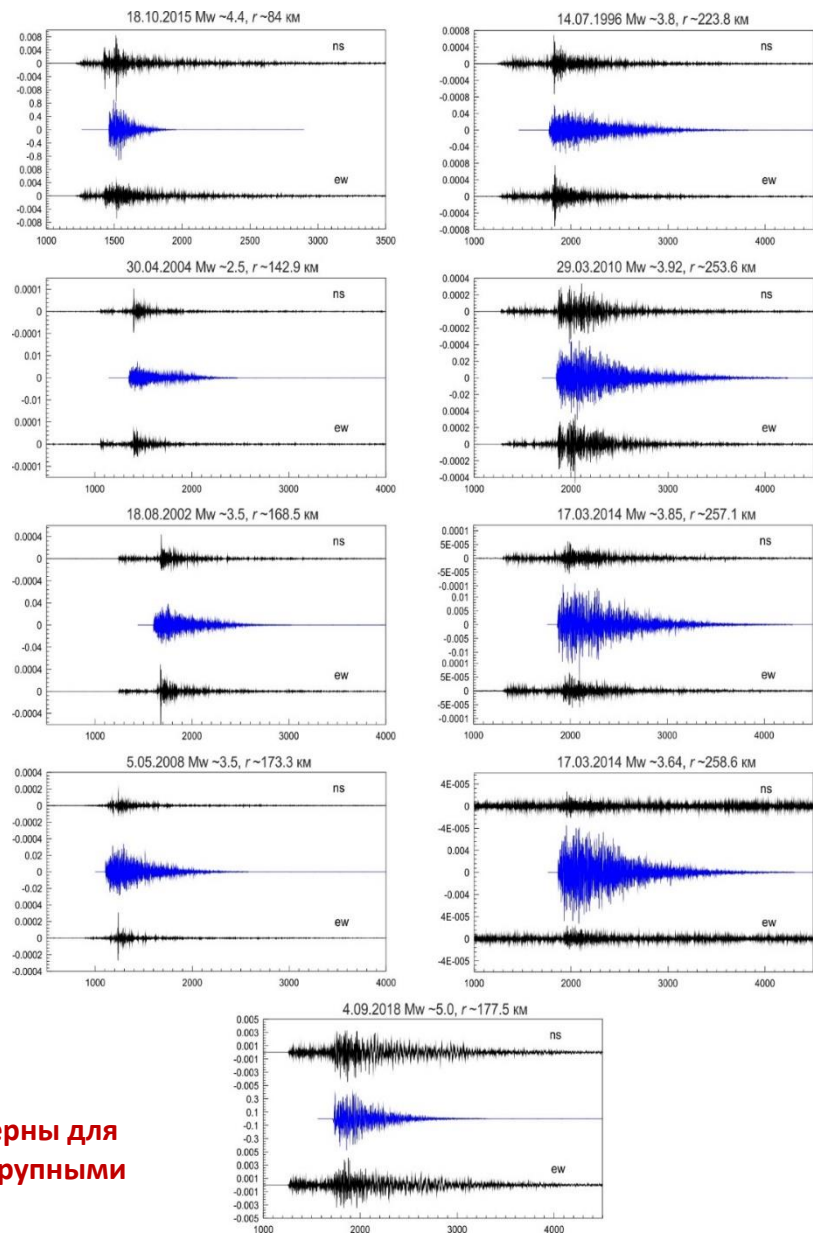
Actions:

Use the checkboxes below to add/remove individual stations from your request.

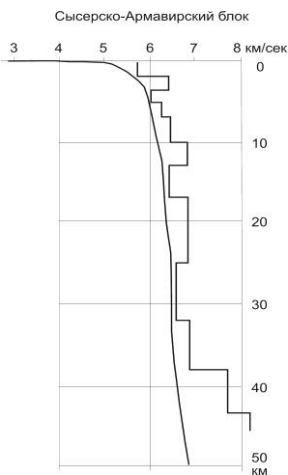
Selected 152 out of 152 stations. Select:  All  None  One station every

Station	Source	Net	Latitude	Longitude	Distance	Azimuth	Elevation	Station Name
<input checked="" type="checkbox"/>	ARU	IRISDMC	56.43°	58.56°	1.65°	11.18°	260 m	Arti, Russia
<input checked="" type="checkbox"/>	BRVK	IRISDMC	53.06°	70.28°	7.44°	98.56°	330 m	Borovoye, Kazakhstan
<input checked="" type="checkbox"/>	OBN	IRISDMC	55.11°	36.57°	12.25°	-79.79°	160 m	Obninsk, Russia
<input checked="" type="checkbox"/>	KURK	IRISDMC	50.72°	78.62°	13.09°	99.71°	184 m	Kurchatov, Kazakhstan
<input checked="" type="checkbox"/>	KIV	IRISDMC	43.96°	42.69°	14.67°	-131.41°	1054 m	Kislovodsk, Russia
<input checked="" type="checkbox"/>	AAK	IRISDMC	42.64°	74.49°	16.25°	131.66°	1633.1 m	Ala Archa, Kyrgyzstan
<input checked="" type="checkbox"/>	LVZ	IRISDMC	67.90°	34.65°	17.00°	-30.64°	630 m	Lovozero, Russia
<input checked="" type="checkbox"/>	MAKZ	IRISDMC	46.81°	81.98°	17.02°	108.08°	600 m	Makanchi, Kazakhstan
<input checked="" type="checkbox"/>	GNI	IRISDMC	40.15°	44.74°	17.11°	-143.49°	1609 m	Garni, Armenia
<input checked="" type="checkbox"/>	KIEV	IRISDMC	50.70°	29.22°	17.75°	-91.46°	180 m	Kiev, Ukraine
<input checked="" type="checkbox"/>	SIMI	IRISDMC	38.66°	69.01°	17.78°	150.72°	1400.5 m	Simigarij, Tajikistan
<input checked="" type="checkbox"/>	KEV	IRISDMC	69.76°	27.00°	20.33°	-30.84°	100 m	Kevo, Finland

## Оценки параметров излучения и распространения сейсмических волн в Уральском регионе



### Скоростной разрез земной коры по ГСЗ Свердловского профиля



$\Delta\sigma \sim 50 \text{ бар}$

$1/R \quad R < 50 \text{ км}$   
 $1/50 \quad 50 \leq R < 150 \text{ км}$   
 $1/R^{0.5} \quad R > 150 \text{ км}$

$Q(f) \sim 130 f^{0.6} \text{ для } r < 200 \text{ км}$   
 $\sim 150 f^{0.7} \text{ для } r > 200 \text{ км}$

$dur(r) \sim 0 \quad 0 < r < 5 \text{ км}$   
 $0.0615r \quad 5 < r < 70 \text{ км}$   
 $4+0.15r \quad r > 70 \text{ км}$

$\kappa \sim 0,02 \text{ с}$

$3.8 \text{ км/с } 2.6 \text{ г/см}^3$

Особенности строения литосферы Урала характерны для пограничных структур, расположенных между крупными плитами континентальной коры

## Коэффициенты УПДГ, зависящие от спектрального периода

$T$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
PGV	4.336809	0.744910	-0.130586	-1.126551	0.175383	-0.003416
PGA	0.416172	0.322472	-0.109281	-1.293378	0.155847	-0.004688
0.02	0.415749	0.321493	-0.109762	-1.293516	0.155764	-0.004679
0.03	0.801687	0.305289	-0.098167	-1.362806	0.160141	-0.004883
0.05	1.272166	0.359747	-0.091202	-1.361649	0.139198	-0.005664
0.075	1.410837	0.492812	-0.080403	-1.271167	0.107827	-0.006273
0.1	1.378241	0.560808	-0.070222	-1.225126	0.098204	-0.005910
0.15	1.266464	0.602051	-0.103438	-1.143799	0.075067	-0.005510
0.2	1.072517	0.579851	-0.143931	-1.081438	0.065104	-0.005347
0.25	0.896899	0.535190	-0.179936	-1.073986	0.071253	-0.004676
0.3	0.794471	0.534248	-0.212658	-1.041812	0.063583	-0.004568
0.4	0.681295	0.579941	-0.283049	-0.982317	0.039173	-0.004279
0.5	0.470730	0.538343	-0.335968	-0.979191	0.042584	-0.003625
0.75	0.018433	0.658764	-0.399108	-0.893634	0.031907	-0.003565
1.0	-0.255888	0.743144	-0.441062	-0.887694	0.032972	-0.002760
1.5	-0.679593	0.982844	-0.423998	-0.902457	0.046006	-0.001921
2.0	-1.077040	1.214210	-0.368096	-0.910801	0.069596	-0.001399
3.0	-1.541530	1.657328	-0.247342	-0.934430	0.086452	-0.000901
4.0	-2.090791	1.830840	-0.158675	-0.971619	0.123109	-0.000773
5.0	-2.474593	1.948040	-0.109515	-1.001623	0.131642	-0.000387
7.5	-3.332308	2.027001	-0.034408	-1.061959	0.170922	0.000130
10.0	-3.983718	1.994428	-0.020883	-1.083146	0.184066	0.000121

$$\ln(Y) = F_M(M) + F_D(R, M) + \varepsilon\sigma$$

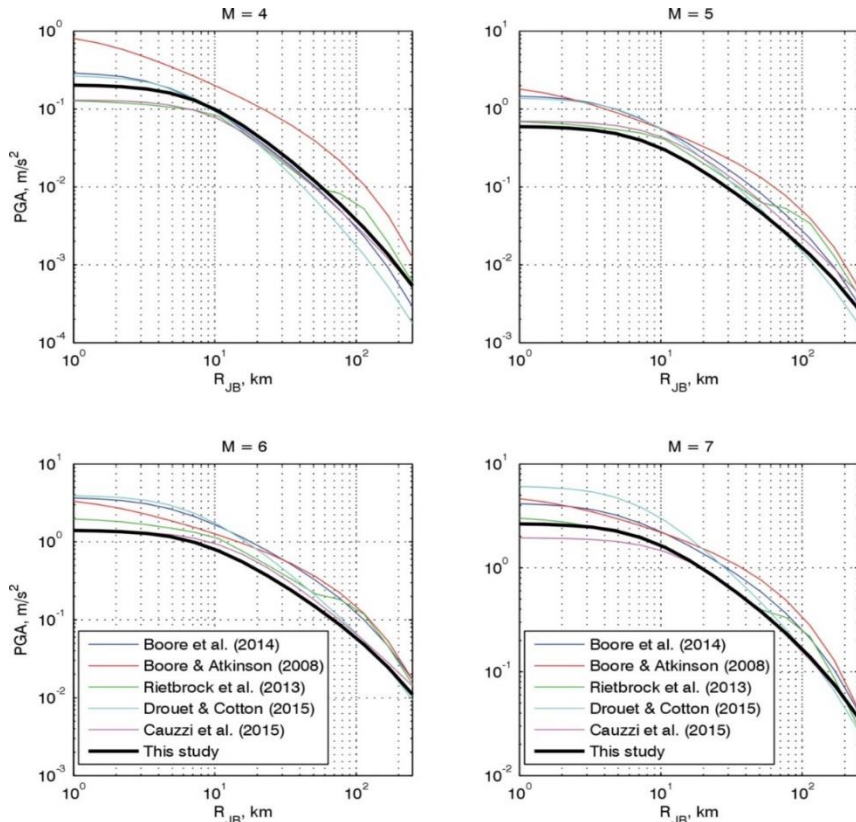
$$F_M(M) = c_1 + c_2(M - M_h) + c_3(M - M_h)^2$$

$$F_D(R, M) = [c_4 + c_5(M - M_{ref})]\ln(R/R_{ref}) + c_6(R - R_{ref})$$

Двухэтапный метод регрессии:

- 1) определяются коэффициенты, описывающие убывание  $Y$  с расстоянием,
- 2) определяется зависимость амплитудных факторов от магнитуды.

$F_M$  и  $F_D$  описывают эффекты очага и пути распространения,  $M$  – магнитуда,  $R$  – расстояние,  $\varepsilon$  – невязка, отражающая разброс наблюдаемых значений  $\ln(Y)$  относительно оценок модели,  $\sigma$  – стандартное отклонение распределения невязки



## Коэффициенты УПДГ, не зависящие от спектрального периода

$M=4-7$  и  $R=1-250$  км

0.02 с - 10 с

$h$	$M_h$	$M_{ref}$	$R_{ref}$
7.5	6.5	4.5	1.0

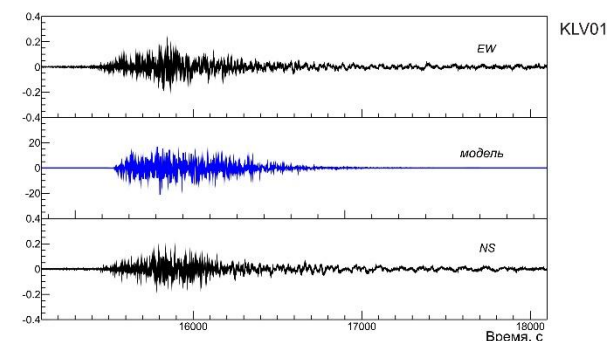
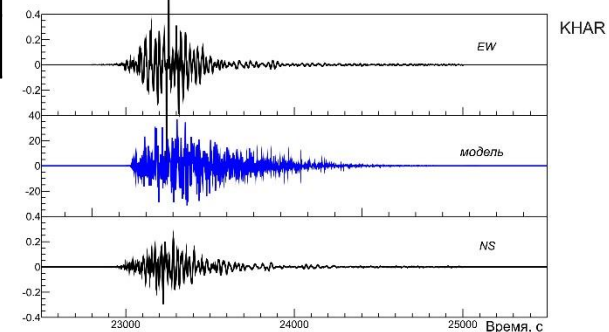
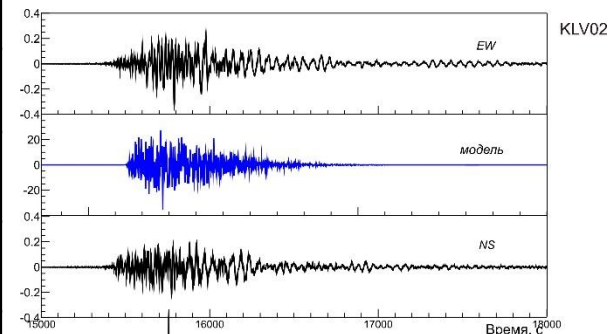
Для учёта неопределённости оценок сейсмических воздействий в рамках ВАСО, для построения логического дерева используются несколько УПДГ из других регионов с соответствующими весами.

В качестве альтернативных выбраны 5 современных УПДГ: 2 глобальных модели для коровой сейсмичности (1 и 2), 2 модели, разработанные для использования в Швейцарских Альпах (4 и 5) и модель, разработанная для Великобритании (3).

# Особенности излучения и распространения сейсмических волн в **Алтае-Саянском регионе**, стохастическое моделирование и разработка уравнений прогноза движений грунта



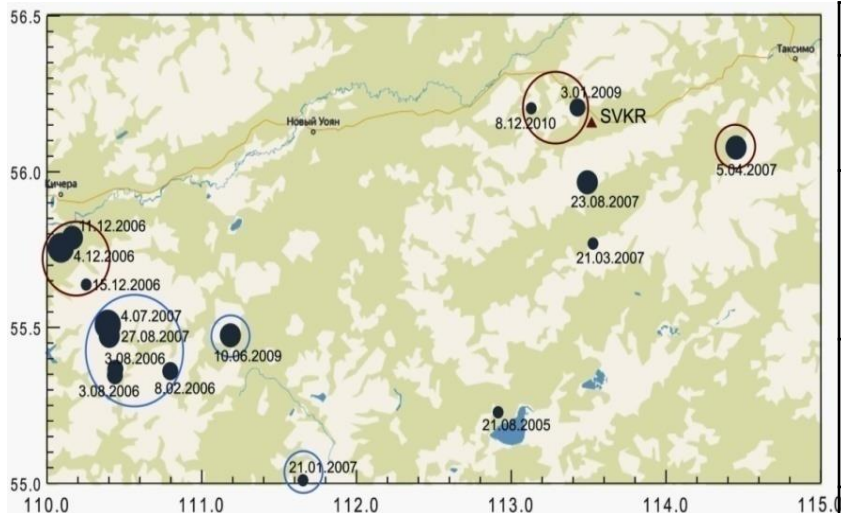
Эпицентр: 54.6311° с.ш., 83.9406° в.д., $h \sim 10$ км
$\Delta\sigma \sim 50$ бар
1/R при $R < 50$ км 1/50 при $50 \leq R < 150$ км
$Q(f) \sim 70 f^{0.9}$ для $r < 50$ км $\sim 30 f^{0.9}$ для $r > 50$ км
$dur(r) \sim 0.3$ для $0 \text{ км} < r < 1 \text{ км}$ $\sim 0.05r$ для $1 \text{ км} < r < 30 \text{ км}$
$\kappa \sim 0,0$ с
3.0 км/с 2.7 г/см <sup>3</sup>



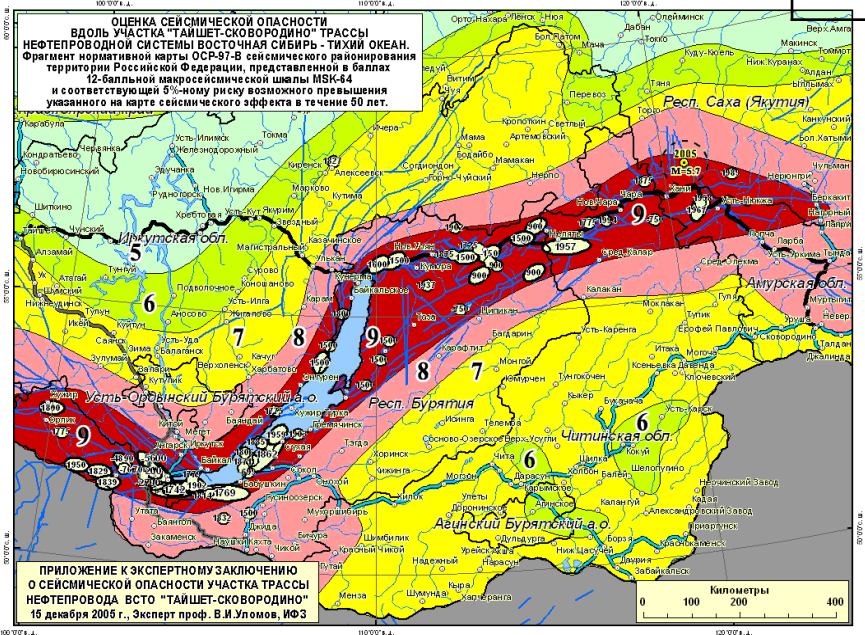
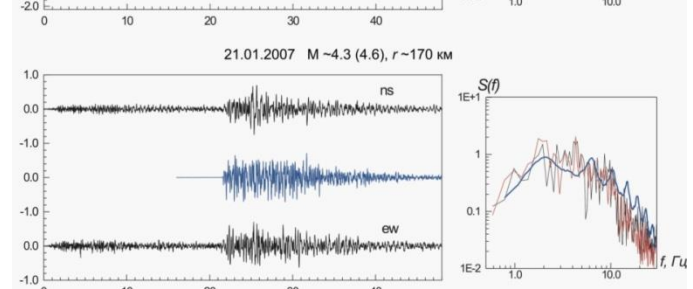
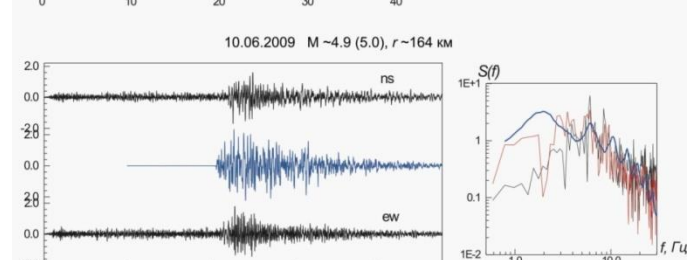
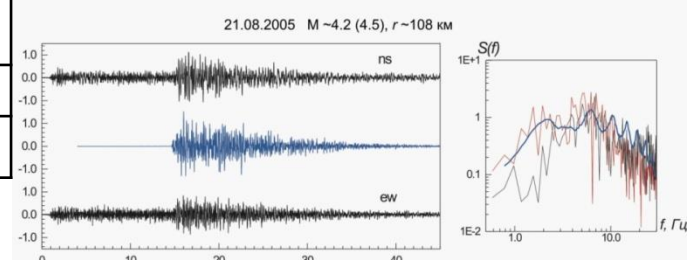
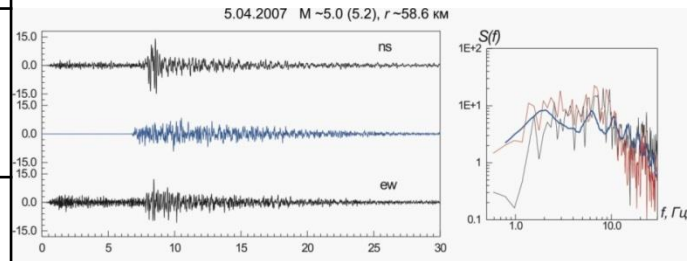
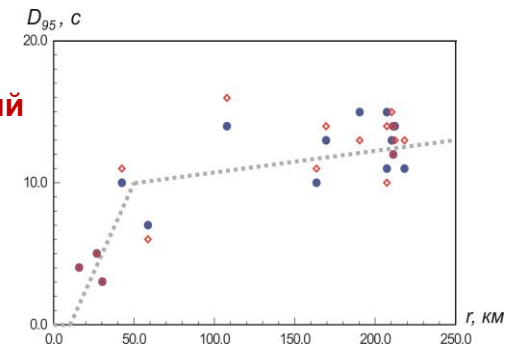
## Землетрясение 27 ноября 2023 г.

Стан-ция	Координаты станции		Выс у.м., м	Грунтовые условия	Гип. и эпиц. расст., км		PGA, см/с <sup>2</sup>
	°С.Ш.	°В.Д.					
KLV02	54.65928	83.71364	144		18.0	14.9	33,2
KHAR	54.61325	83.58966	130	Грунт	24.8	22.7	~40,0
KLV01	54.74281	83.57880	245		28.0	26.2	17,4
NVS	54.84063	83.23444	168	Кварц.жила	51.6	50.7	1,06
NHES	54.85507	82.98549	121	Аллювий	66.7	65.9	0,8
BSTK	54.56765	82.65347	121	Аллювий	84.0	83.4	0,33
SALR	54.41694	85.70287	250		116.7	116.3	0,24

# Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, стохастическое моделирование и разработка уравнений прогноза движений грунта

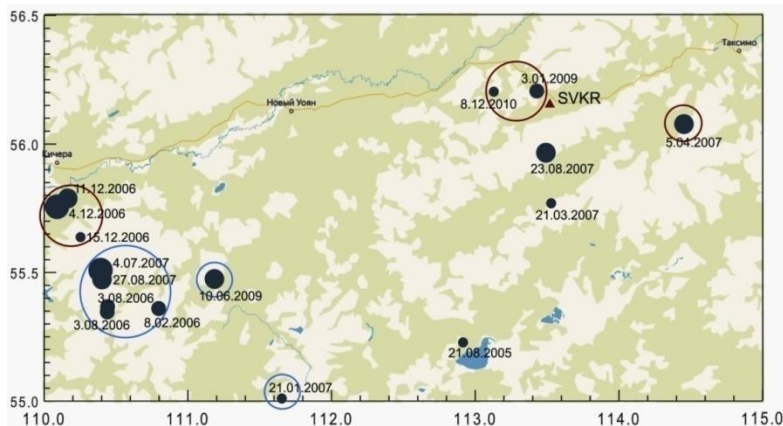
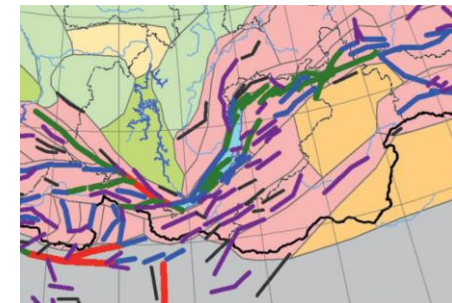


$\Delta\sigma \sim 100$ бар
$1/R \quad R < 50$ км $1/50 \quad 50 \leq R < 150$ км $1/R^{0.5} \quad R > 150$ км
$Q(f) \sim 60 f^{1.05} \quad r \sim 15-30$ км, $\sim 80 f^{1.0} \quad r \sim 40-60$ км, $\sim 90 f^{0.9} \quad r \sim 100-110$ км, $\sim 150 f^{0.7} \quad r \sim 160-220$ км
$dur(r) \sim 0 \quad 0 < r < 5$ км $0.222r \quad 5 < r < 50$ км $10 + 0.015r \quad r > 50$ км
$\kappa \sim 0,012$ с
$3.8$ км/с $2.6$ г/см <sup>3</sup>



## Сейсмостанции Улан-Удэ, Северомуйск

# Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, стохастическое моделирование и создание параметрических моделей излучения и распространения сейсмических волн и уравнений прогноза движений грунта



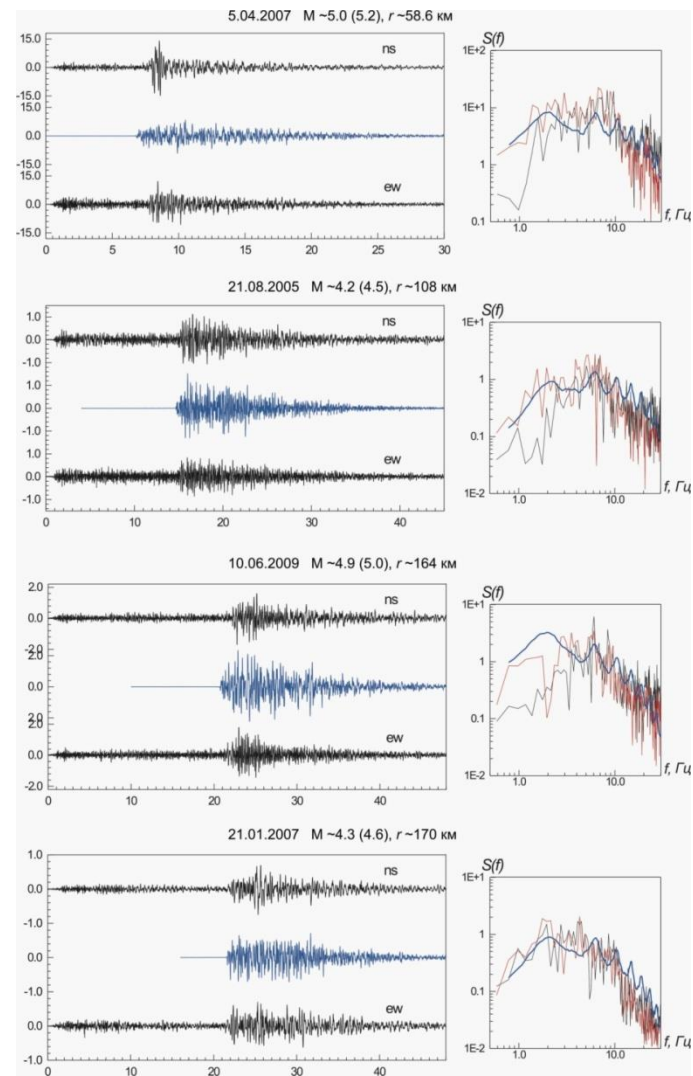
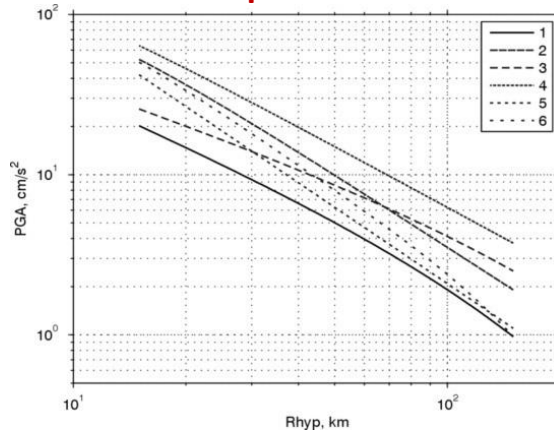
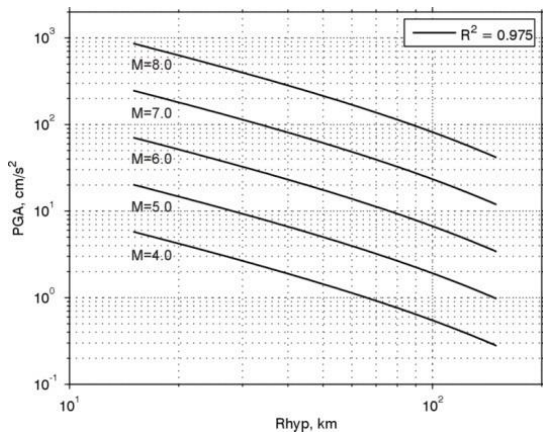
ст. Улан-Удэ, Северомуйск

$$\log(\text{PGA}) = c_1 + c_2 M_w - \log(R) + c_3 R + \varepsilon$$

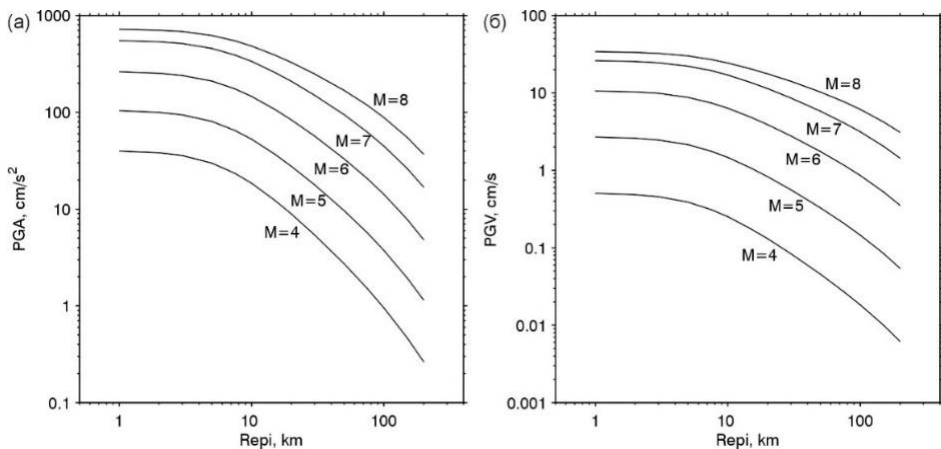
$c_1$	$c_2$	$c_3$
$-0.463 \pm 0.1424$	$1.2515 \pm 0.0215$	$-0.0054 \pm 0.0006$

$\Delta\sigma \sim 100 \text{ бар}$
$1/R \quad R < 50 \text{ км}$ $1/50 \quad 50 \leq R < 150 \text{ км}$ $1/R^{0.5} \quad R > 150 \text{ км}$
$Q(f) \sim 60 f^{1.05} \quad r \sim 15-30 \text{ км},$ $\sim 80 f^{1.0} \quad r \sim 40-60 \text{ км},$ $\sim 90 f^{0.9} \quad r \sim 100-110 \text{ км},$ $\sim 150 f^{0.7} \quad r \sim 160-220 \text{ км}$
$dur(r) \sim 0 \quad 0 < r < 5 \text{ км}$ $0.222r \quad 5 < r < 50 \text{ км}$ $10 + 0.015r \quad r > 50 \text{ км}$
$\kappa \sim 0,012 \text{ с}$
$3.8 \text{ км/с} \quad 2.6 \text{ г/см}^3$

проект GEM







$$\ln(Y) = F_M(M) + F_D(R_{epi}, M) + \varepsilon\sigma$$

$$F_M(M) = e_1 + \begin{cases} e_2(M - M_h) + e_3(M - M_h)^2, & M \leq M_h \\ e_4(M - M_h), & M > M_h \end{cases}$$

$$F_D(R_{epi}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln(R/R_{ref}) + c_3(R - R_{ref})$$

T	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>
PGA	-1.1201	0.1477	-0.0046	0.8278	0.6136	-0.0158	0.0000
PGV	-1.0145	0.1450	-0.0033	4.4790	0.7283	-0.1506	0.0000

h	M <sub>h</sub>	M <sub>ref</sub>	R <sub>ref</sub>	σ
6.23	6.75	4.5	1.0	0.55

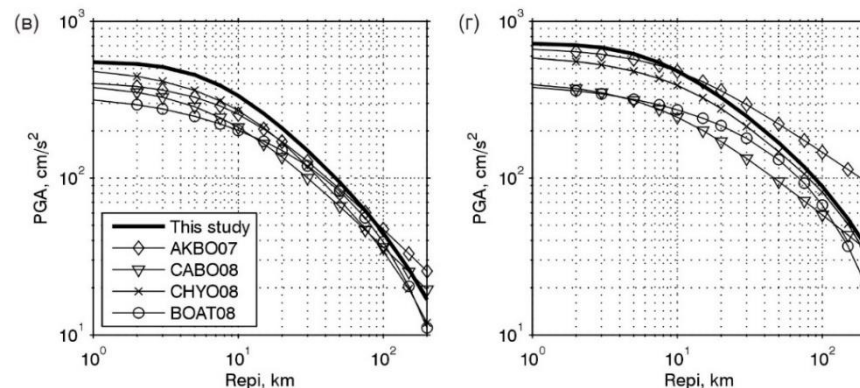
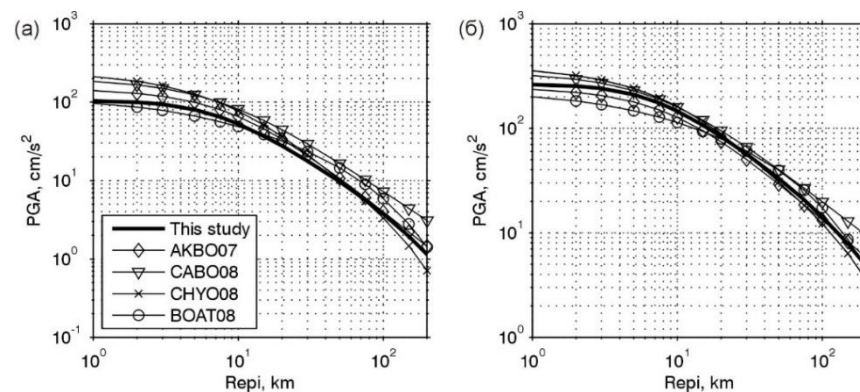
**GEM – Global Earthquake Model** - публичная некоммерческая организация с государственным участием; один из продуктов - рекомендуемые УПДГ для разных регионов

Для **Байкальской Рифтовой Зоны** GEM рекомендует пять уравнений:

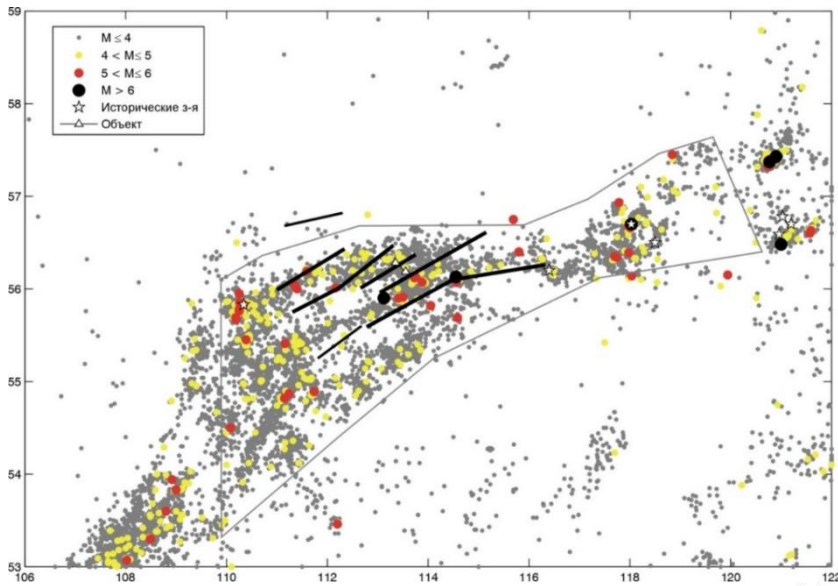
[Akkar, Bommer, 2007; Cauzzi, Faccioli, 2008] - создавались для Европы, и

разработанные в проекте Next Generation Attenuation [Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Chiou, Youngs, 2008], которые позиционируются как универсальные для коровой сейсмичности.

**AKBO07** – [Akkar, Bommer, 2007], **BOAT08** – [Boore, Atkinson, 2008], **CABO08** – [Campbell, Bozorgnia, 2008], **CHYO08** – [Chiou, Youngs, 2008].



# Учет пространственной неоднородности параметров сейсмического режима для построения надежных оценок сейсмической опасности



Закон Гутенберга-Рихтера:

$$\log_{10}(N) = a - bM$$

Оценка Аки-Утсу:

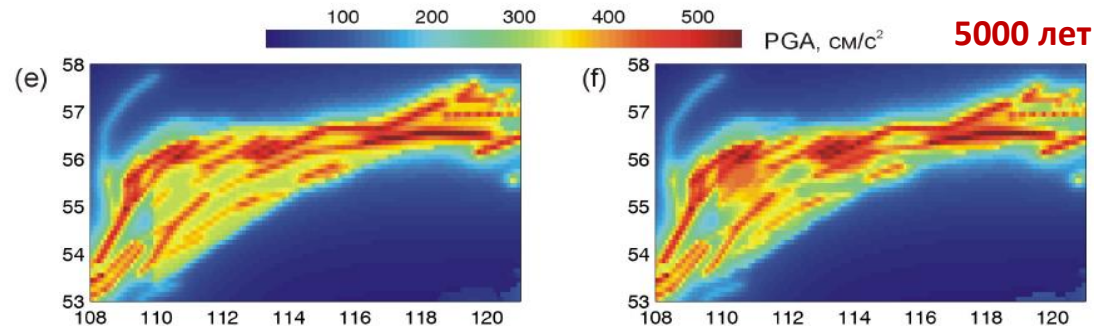
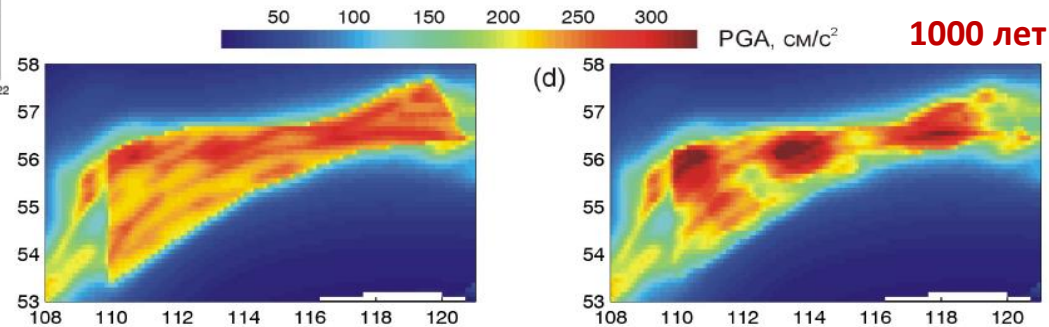
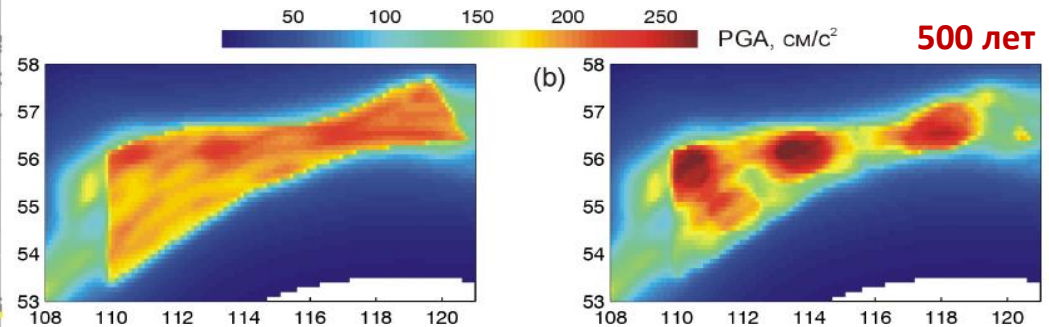
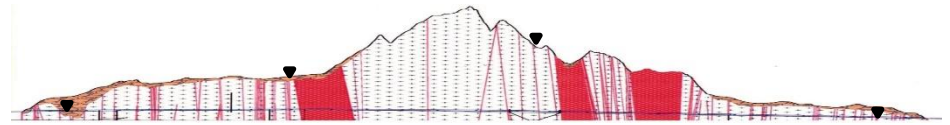
$$\hat{b} = \frac{\log_{10}(e)}{\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)}$$

$$\hat{a} = \log_{10}(N) + \hat{b}M_c$$

Обобщение оценки Аки-Утсу для каталогов с изменяющейся представительной регистрацией [Kijko and Smit \(2012\)](#):

$$\hat{b} = \frac{n}{\sum_i^s (n_i / \hat{b}_i)}$$

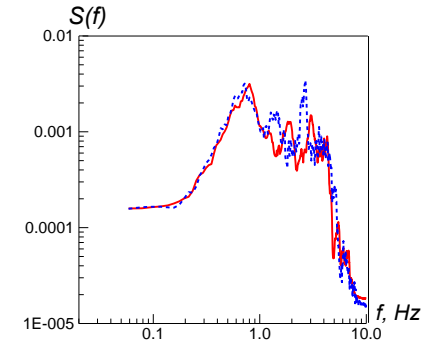
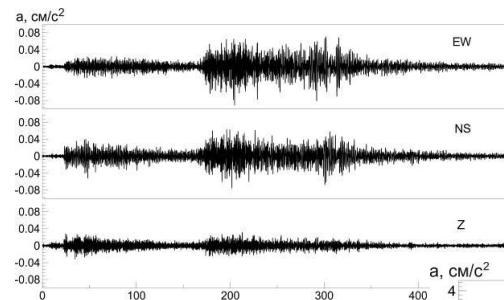
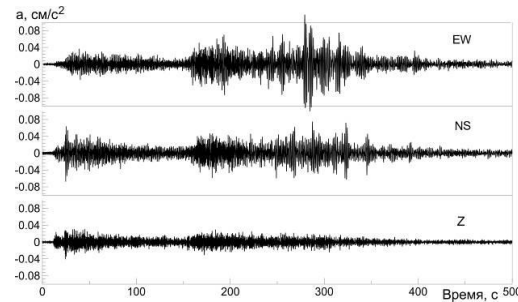
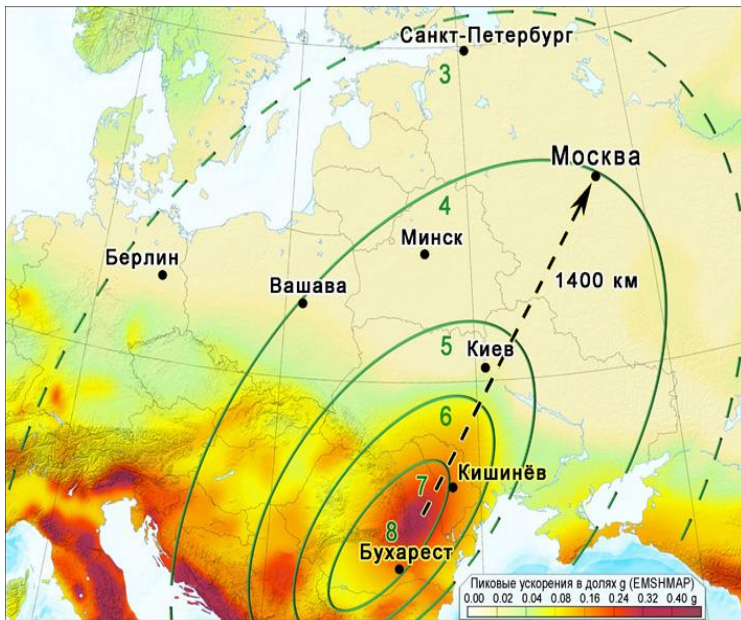
$$\hat{\lambda}_m = \frac{n}{\sum_i^s t_i \exp[-\hat{\beta}(M_c^i - m)]}$$



традиционный подход

с учётом пространственной неоднородности параметров сейсмического режима

## Оценка сейсмических воздействий на площадке Лахта-центр в Санкт-Петербурге от удаленных землетрясений с очагами в зоне Вранча (Восточные Карпаты)

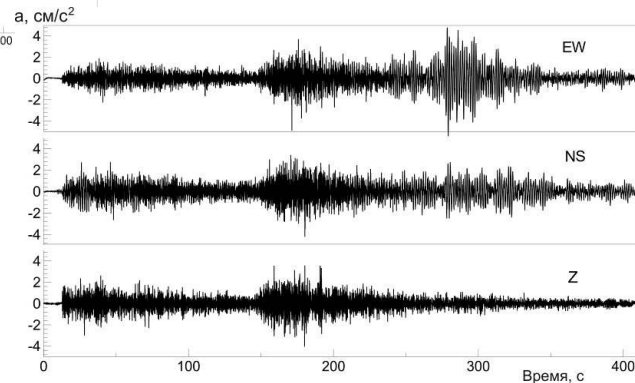


**резонансное  
усиление колебаний  
на 0,5 – 3 Гц**

### Акселерограммы землетрясений на сейсмостанции Пулково

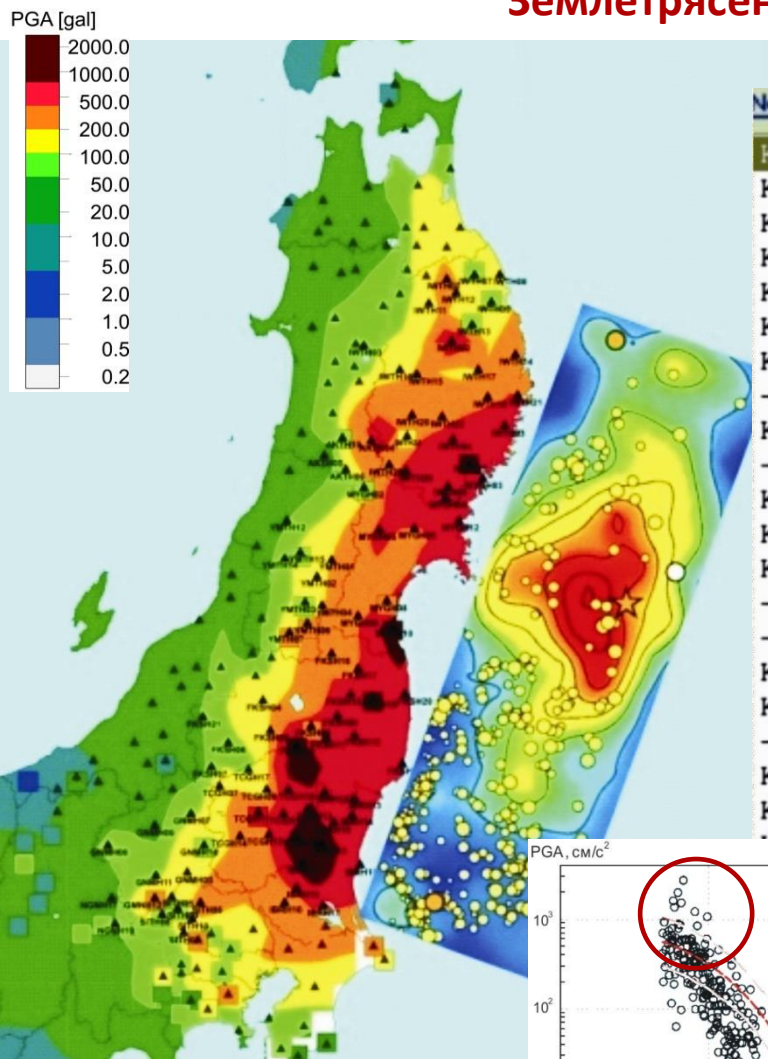
Дата	Время	широта	долгота	глубина	магнитуд а
2004/10/27	20:34:36.81	45.787	26.622	95.8	5.9 Mw
2014/11/22	19:14:16.00	45.898	27.151	32.0	5.3 Mw
2016/09/23	23:11:20.06	45.715	26.618	92.0	5.6 Mw
2016/12/27	23:20:55.94	45.714	26.599	96.9	5.5 Mw
2018/10/28	00:38:11.39	45.608	26.407	147.8	5.5 Mw

PGA при сценарном землетрясении в Санкт-Петербурге  $\sim 4,7\text{--}7,6 \text{ см/с}^2$ , что выше, чем в Москве:  $\sim 2,16 \pm 0,33 \text{ см/с}^2$ , что очевидно связано с влиянием грунтовых условий: резонансным усилением колебаний на 0,5 – 3 Гц

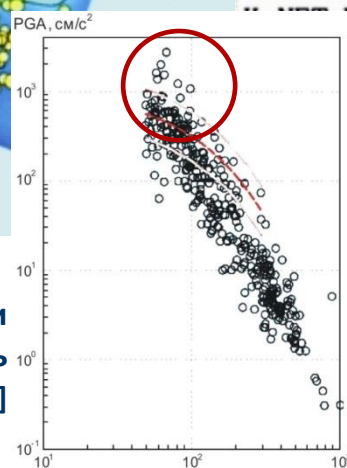


**Моделирование сценарного  
землетрясения:  $M_w = 8.0$ ,  $\Delta\sigma \sim 320 \text{ бар}$   
в Санкт-Петербурге  
по записям 27.10.2004 г.  $M_w=5.9$**

## Землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. (Mw=9.0)



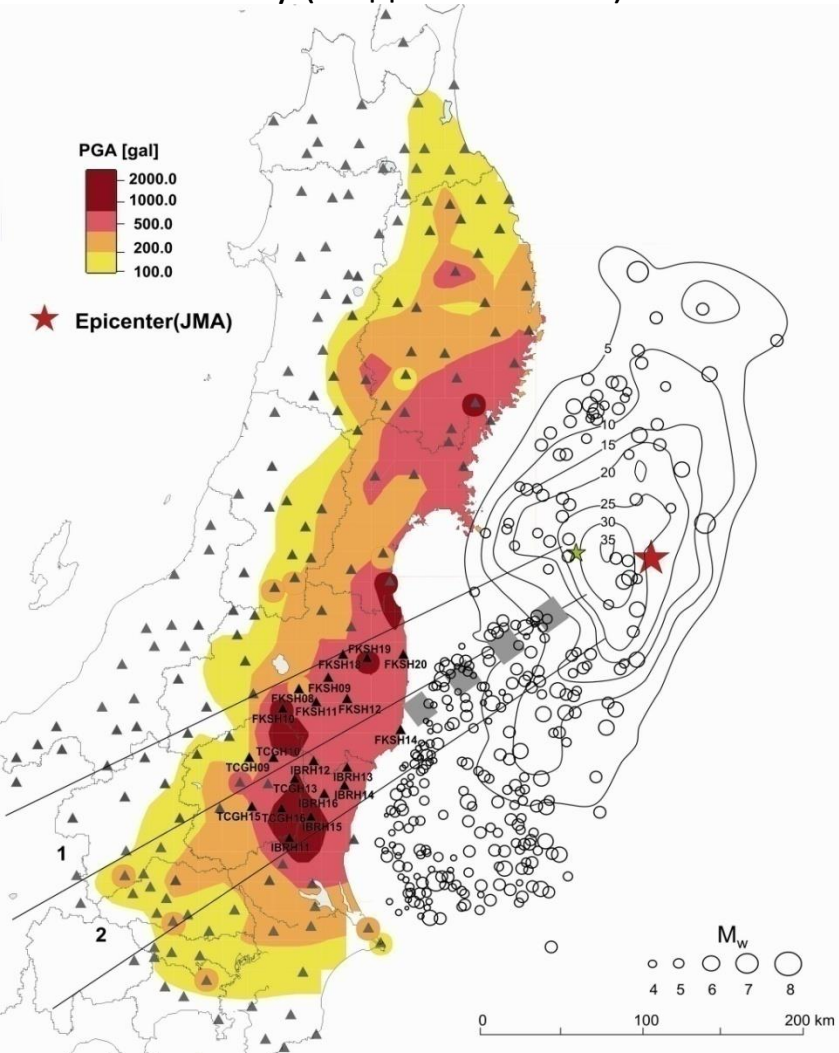
Network	Site code	Recording start time	Latitude	Longitude	Peak acceleration▼	Intensity	Epic
K-NET	MYG004	2011/03/11-14:46:51	38.73N	141.02E	2933.2gal	6.6	0175km
K-NET	MYG012	2011/03/11-14:46:50	38.32N	141.02E	2018.9gal	6.0	0163km
K-NET	IBR003	2011/03/11-14:47:05	36.59N	140.65E	1845.2gal	6.4	0258km
K-NET	MYG013	2011/03/11-14:46:50	38.27N	140.93E	1807.8gal	6.3	0170km
K-NET	IBR013	2011/03/11-14:47:17	36.16N	140.49E	1762.3gal	6.4	0301km
K-NET	TCG009	2011/03/11-14:47:22	36.73N	139.72E	1444.0gal	6.2	0317km
K-NET	FKS016	2011/03/11-14:47:06	37.12N	140.19E	1425.3gal	6.1	0259km
-KiK-	FKSH10	2011/03/11-14:47:04	37.16N	140.09E	1335.4gal	6.0	0266km
K-NET	IBR004	2011/03/11-14:47:11	36.55N	140.41E	1311.9gal	6.0	0277km
-KiK-	TCGH16	2011/03/11-14:47:08	36.55N	140.08E	1304.8gal	6.5	0301km
K-NET	TCG014	2011/03/11-14:47:09	36.55N	140.17E	1291.1gal	6.3	0294km
K-NET	FKS010	2011/03/11-14:46:57	37.23N	141.00E	1239.9gal	5.9	0190km
K-NET	IWT010	2011/03/11-14:46:52	38.93N	141.12E	1225.8gal	5.9	0178km
-KiK-	IBRH11	2011/03/11-14:47:10	36.37N	140.14E	1223.9gal	6.2	0309km
-KiK-	MYGH10	2011/03/11-14:46:48	37.94N	140.89E	1136.8gal	6.0	0174km
K-NET	FKS018	2011/03/11-14:47:00	37.40N	140.36E	1110.5gal	5.9	0234km
K-NET	FKS008	2011/03/11-14:46:58	37.44N	140.57E	1069.2gal	5.7	0215km
-KiK-	IBRH15	2011/03/11-14:47:08	36.56N	140.30E	1062.2gal	5.7	0284km
K-NET	CHB007	2011/03/11-14:47:26	35.72N	140.23E	1053.5gal	5.5	0353km
K-NET	IBR005	2011/03/11-14:47:10	36.39N	140.24E	0996.0gal	6.1	0301km
-KiK-	TYG011	2011/03/11-14:46:42	38.31N	141.50E	0939.2gal	5.6	0121km
-KiK-	FKSH19	2011/03/11-14:46:53	37.47N	140.72E	0914.0gal	6.0	0201km
-KiK-	TCGH13	2011/03/11-14:47:05	36.73N	140.18E	0907.5gal	6.1	0282km
-KiK-	FKS007	2011/03/11-14:46:55	37.41N	140.96E	0880.6gal	5.7	0184km



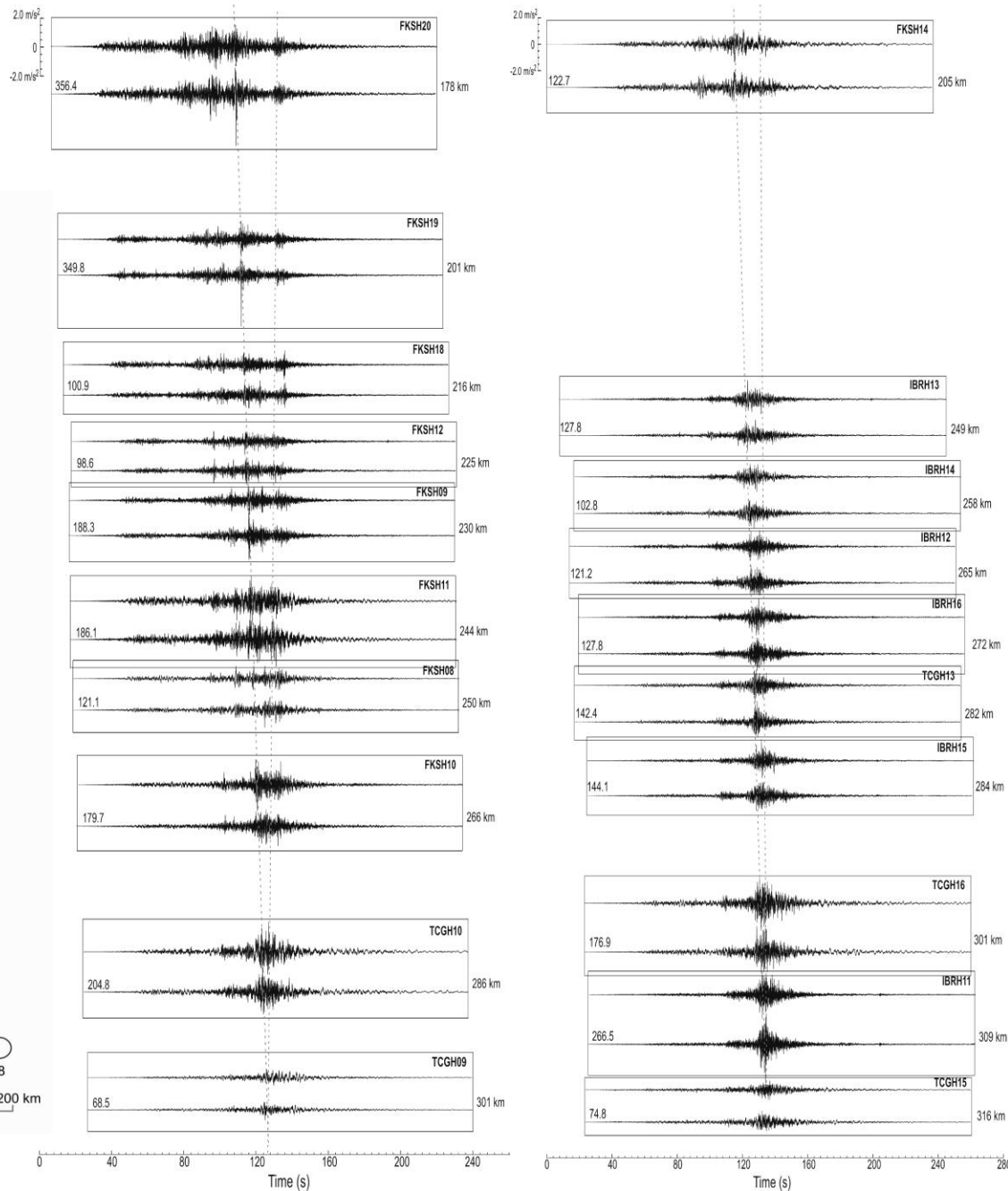
**19 станций сильных движений K-NET и KiK-net зарегистрировали ускорения выше 1 g**

Наблюденные ускорения и эмпирическая зависимость затухания [Si, Midorikawa, 1999]

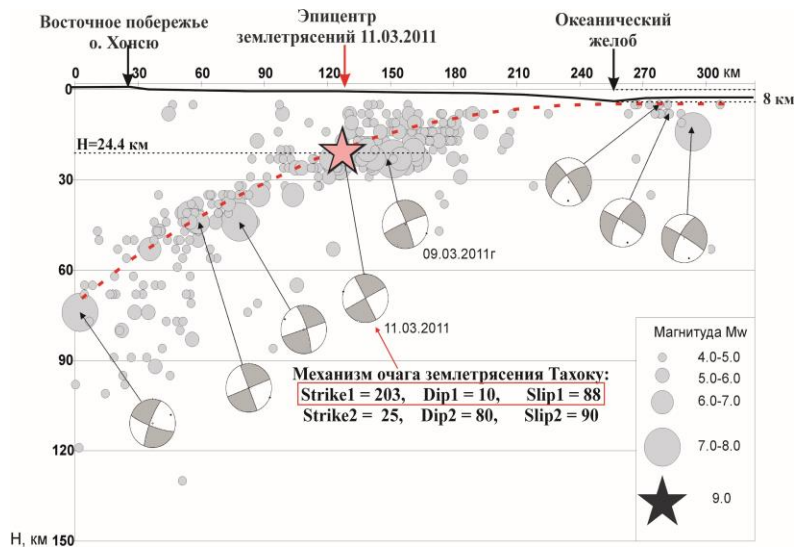
# Пиковые ускорения (PGA) зарегистрированные при землетрясении Тохоку (по данным NIED)



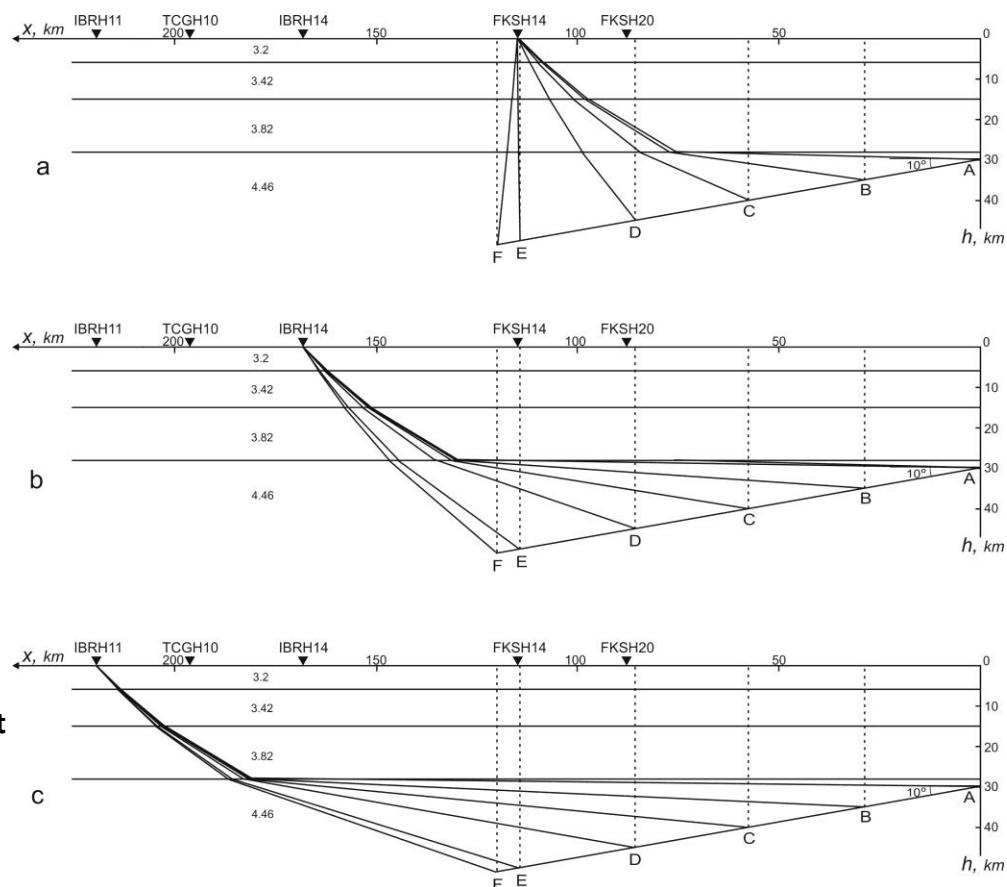
Модель очага K. Koketsu et al., Earth and Planet. Sci. Lett. 310(2011) 480-486



Записи основного толчка землетрясения Тохоку



Продолжительность сильных движений на станциях KiK-net при распространении со скоростью  $V$  трещины на участке разломной плоскости длиной  $l$  при землетрясении Тохоку ( $l \sim 120$  км,  $\alpha \sim 10^\circ$ ,  $V \sim 4$  км/с)



Момент излучения S-волн концом трещины (с)	Координата проекции конца бегущей трещины на ось X (км)			Глубина конца трещины $h$ (км)	Время пробега S-волн от конца трещины к станциям KiK-net(с)			Время прихода S-волн к станциям сети KiK-net(с)		
	FKSH14	IBRH14	IBRH11		FKSH14	IBRH14	IBRH11	FKSH14	IBRH14	IBRH11
0 (A)	115	168	219	30	30.4	42.4	53.9	30.4	42.3	53.9
7.2 (B)	86.5	139.5	190.5	35	24.3	36.1	47.5	31.5	43.3	54.7
14.4 (C)	58	111	162	40	18.4	29.9	41.3	32.8	44.3	55.7
21.6 (D)	29.5	82.5	133.5	45	14.0	23.9	35.0	35.6	45.5	56.6
28.8 (E)	1	54	105	50	12.8	18.7	29.1	41.6	47.5	57.9
30.2 (F)	-4.7	48.3	99.3	51	13.2	18.0	27.8	43.4	48.2	58.0

Продолжительность сильных движений: 13.0 с 5.9 с 4.1 с

Relativity and Common Sense  
A New Approach to Einstein by  
**HERMANN BONDI**, New York 1964

**Г. Бонди** Относительность и  
здравый смысл, МИР, Москва  
1967

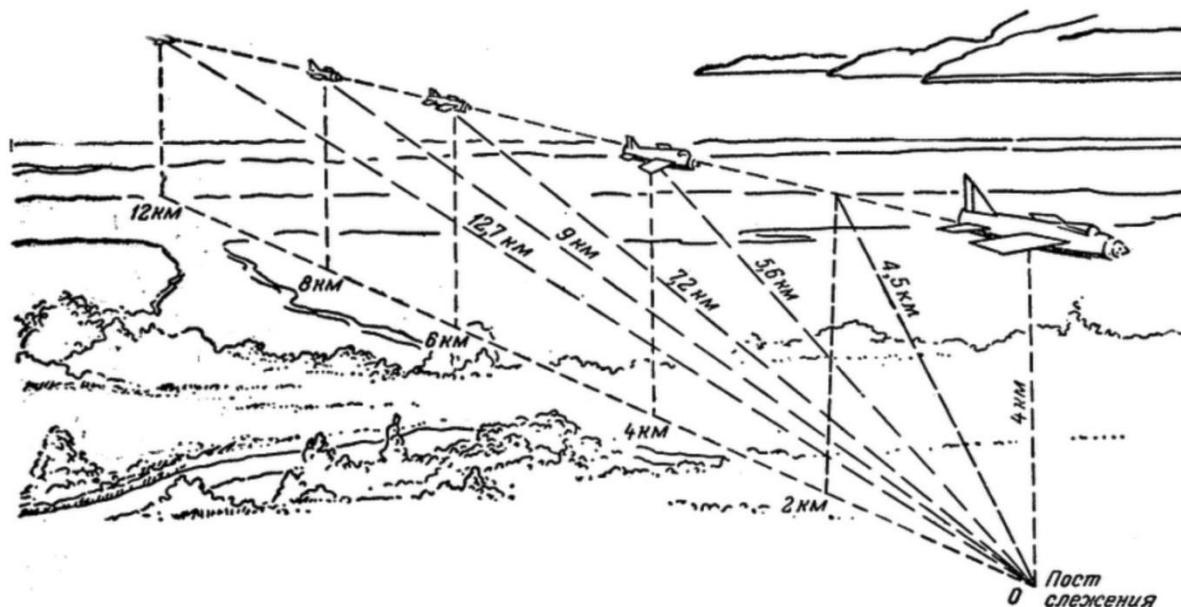


Рис. 7. К обсуждению ударной волны от сверхзвукового самолета

Близкую часть полета слышим  
в обычной  
последовательности, а  
дальнюю часть полета - в  
обратном порядке:  
первыми приходят волны,  
излученные позже

В результате к нам  
одновременно доходит звук,  
излученный самолетом сразу на  
значительной части его пути

возникает **ударная волна**

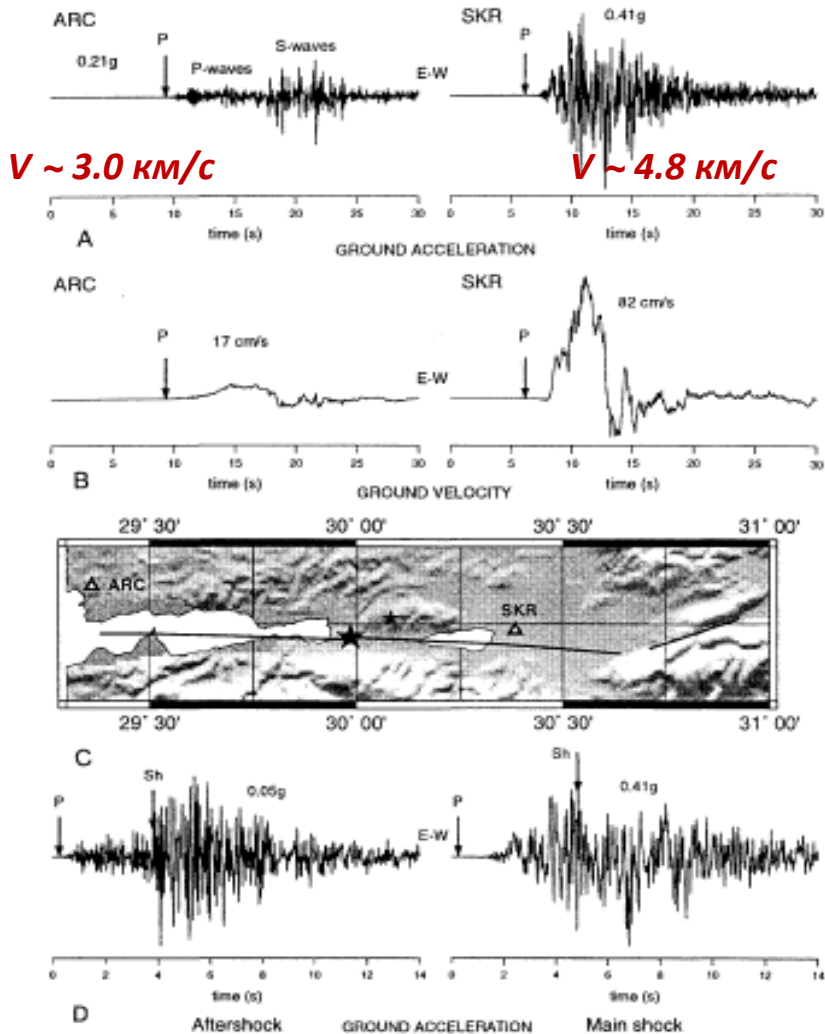
Таблица 1

Момент испускания звука, сек	Координата точки, над которой пролетает самолет, км	Расстояние от самолета до наблюдателя по прямой, км	Время пробега звука, сек	Момент прихода звука к наблюдателю, сек
0	12	12,7	38,5	0+38,5
0+5	10	10,8	32,7	0+37,7
0+10	8	9,0	27,3	0+37,3
0+15	6	7,2	21,8	0+36,8
0+20	4	5,6	17,0	0+37,0
0+25	2	4,5	13,6	0+38,6
0+30	0	4,0	12,1	0+42,1

# How Fast is Rupture during an Earthquake ? New Insights from the 1999 Turkey Earthquakes

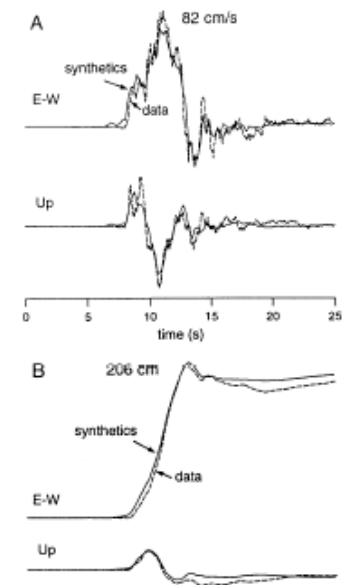
Michel Bouchon,<sup>1</sup> Marie-Paule Bouin,<sup>2</sup> Hayrullah Karabulut,<sup>3</sup> M. Nafi Toksöz,<sup>4</sup> Michel Dietrich,<sup>1</sup> and Ares J. Rosakis<sup>5</sup>

We report that during the two devastating 1999 earthquakes in Turkey, rupture propagated over a large part of the nearly 200km long fault zone at supershear speed approaching 5km/s. We present observations and modeling which confirm the original inference of supershear rupture during the Izmit earthquake and we show that supershear rupture also occurred during the Düzce earthquake. We show that the rupture velocity measured - about  $\sqrt{2}$  times the shear wave velocity - is the value predicted by theoretical studies in fracture dynamics. We look for clues to explain these observations.



$$V < V_R \quad V_S < V < V_P$$

the passage of the conical shock wave front



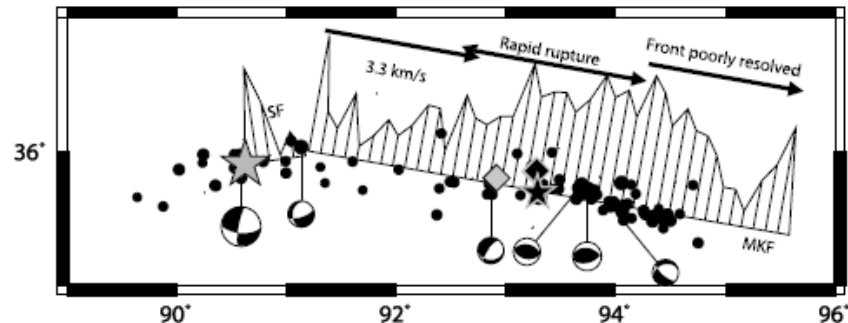


# The $M_w$ 7.8, 2001 Kunlunshan earthquake: Extreme rupture speed variability and effect of fault geometry

super- $P$  wave rupture speed

D. P. Robinson,<sup>1</sup> C. Brough,<sup>1</sup> and S. Das<sup>1</sup>

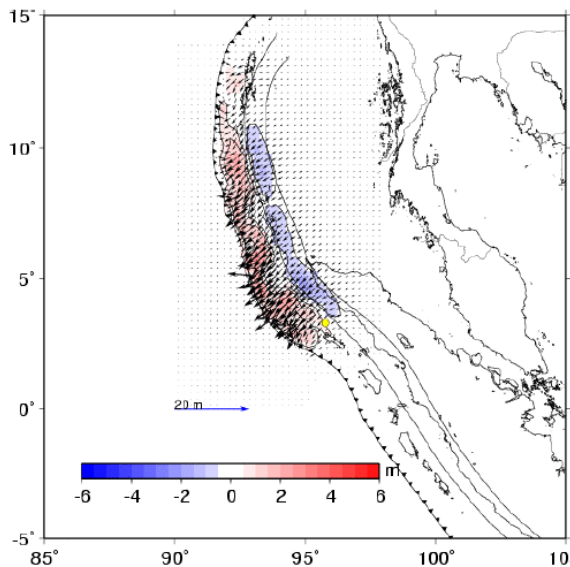
Скорость вспарывания разлома Куньлунь при землетрясении  $M_w$  7.8 2001 была различна: на 1-й стадии от 0 до в среднем **3.3 км/с на 120 км**. Затем **150 км на скорости выше скорости P-волн**. На последней стадии скорость снижалась.



При Суматранском землетрясении 26 декабря 2004 г. трещина распространялась 600 км со средней скоростью **2.5 км/с**, и пока неясно, с какой скоростью на остальной части разрыва.

Поперечный размер очага ~200 км, и разрыв был «antiplane» в простирании и «in-plane» в падении

**Крупные субдукционные землетрясения (как Суматранское) могут иметь длинный «in-plane» фронт разрыва, который может достигать скоростей вспарывания как при Куньлуньском землетрясении**

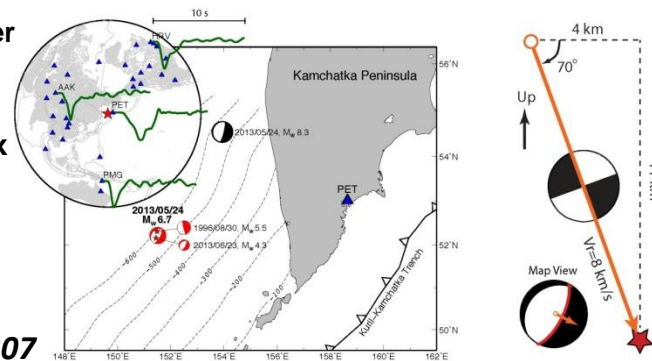


## Supershear rupture in a $M_w$ 6.7 aftershock of the 2012 Sea of Okhotsk earthquake

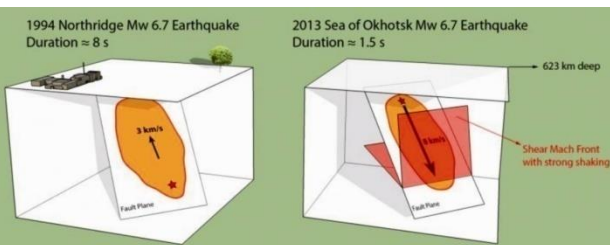
Z. Zhan, D.V. Helmberger, H. Kanamori, P.M. Shearer

the first deep supershear earthquake

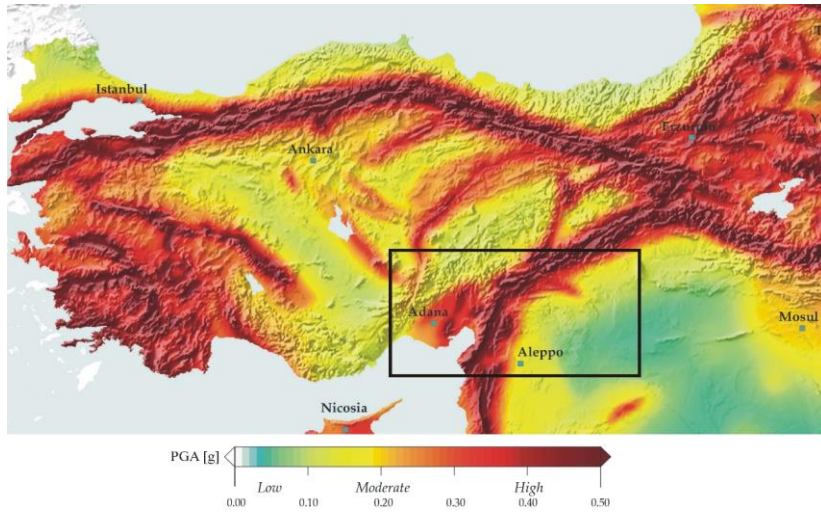
По волновым формам на региональных и телесеизмических станциях и очень короткой продолжительности (~2 с вместо 7-8 с) сделан вывод об ударном фронте



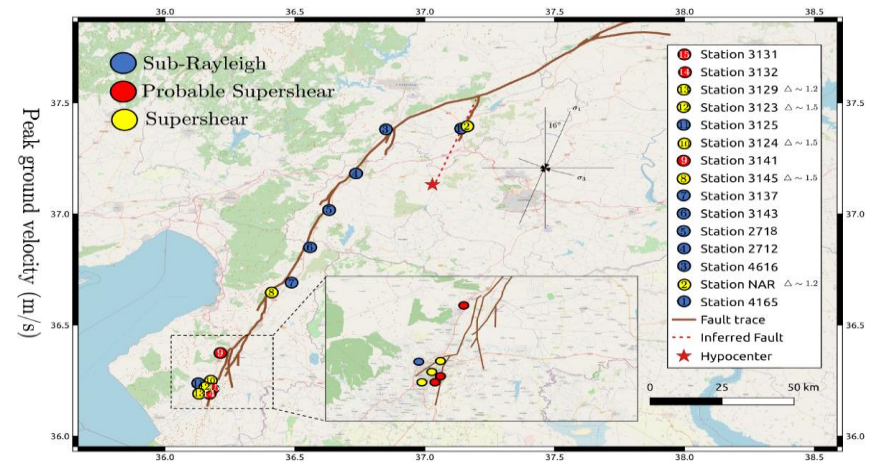
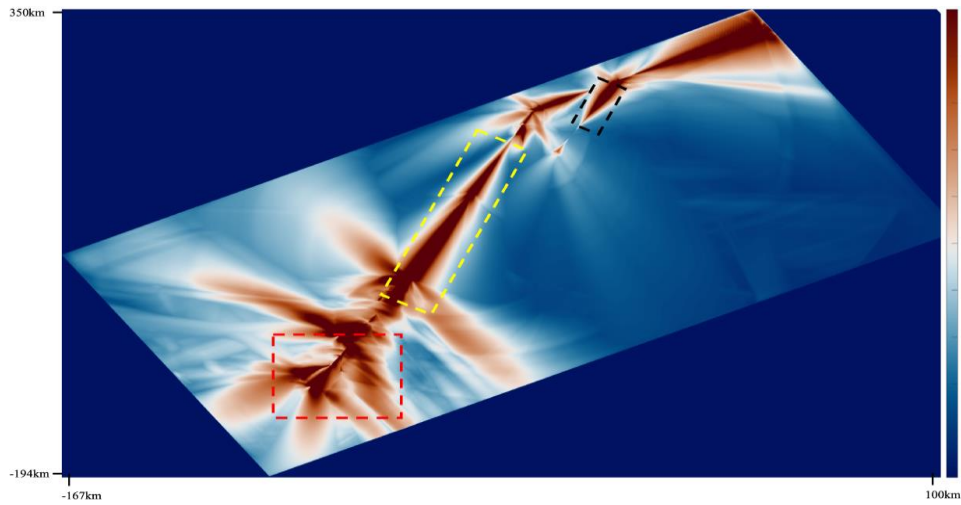
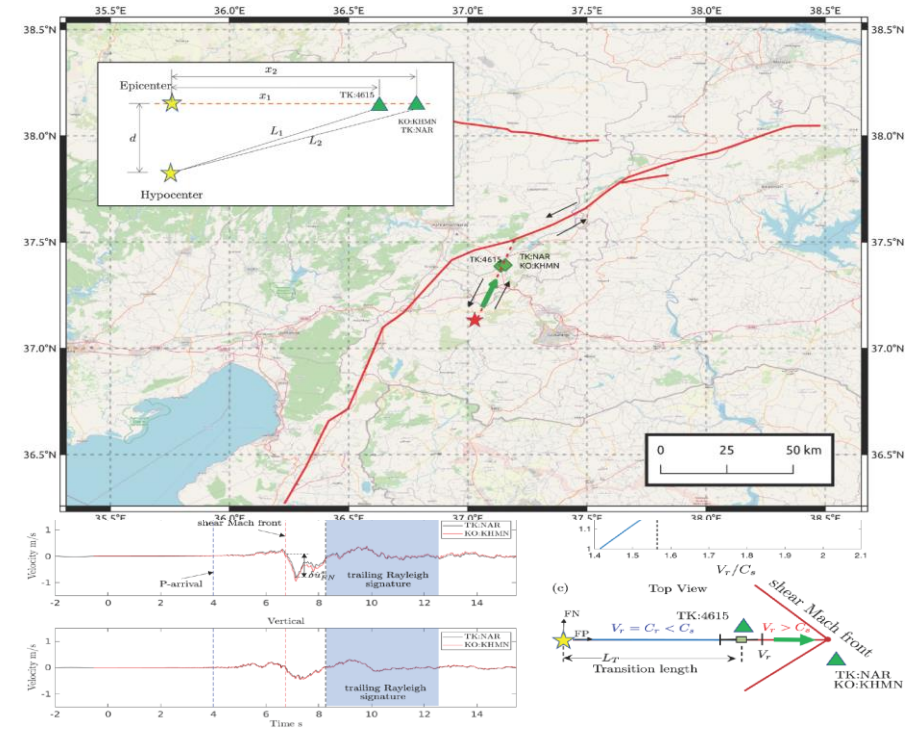
Science 11 July 2014: Vol. 345 no. 6193 pp. 204-207



# ЭФФЕКТЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ 6 ФЕВРАЛЯ 2023 Г.



Распределение пиковых скоростей (PGV), полученное в результате численного моделирования динамического разрыва (из работы [Abdelmeguid et al., 2023]).



**«Удар такой был силы, что вместе со стулом я перелетел через стол, пролетел три с половиной метра»...**

**(из фильма интернет-издания Спектр о Нефтегорском землетрясении)**





**Prof. H. Kawase J.**  
**Working Group of Effect**  
**of Surface Geology on**  
**Seismic Motion (JW-ESG)**



**Prof. Andrzej Kijko**  
**University of Pretoria,**  
**Natural Hazard Centre,**  
**South Africa**