



## Расчет и моделирование сейсмических воздействий для проектных основ и строительства

**О.В. Павленко** Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
[olga@ifz.ru](mailto:olga@ifz.ru)



**Требуется корректная оценка интенсивности сотрясений, пиковых ускорений, пиковых скоростей и смещений, длительности воздействий, спектрального состава колебаний**

### **Лаборатория 306 Инженерной сейсмологии и интерпретации сейсмических наблюдений**

Развитие фундаментальных основ инженерной сейсмологии, создание расчетных основ для изучения проявлений основных типов сейсмичности: коровой, субдукционной, и стабильных континентальных плит – в регионах России

## Задачи :

1. Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн (по оценкам сброшенных в очагах напряжений, добротности среды, типичным локальным эффектам) в различных регионах России: на **Северном Кавказе, Урале, в Байкальской рифтовой зоне, Алтае-Саянском регионе** и др.
2. Накопление данных по сильным движениям, создание баз данных, стохастическое моделирование акселерограмм сильных землетрясений....



**Александр Александрович Гусев**



**НИИСтр** строительство  
научно-исследовательский центр



**НИИОСП**  
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА

Joint Working Group of the Effect of  
Surface Geology on Seismic Motion  
(JW-ESG)



University of Pretoria Natural  
Hazard Centre, Africa



Развитие сетей сейсмических наблюдений, накопление и анализ сейсмических данных в последние десятилетия привели к существенному прогрессу в изучении очагов землетрясений, среды распространения сейсмических волн и локальных эффектов

## Компромиссные/устаревшие подходы:

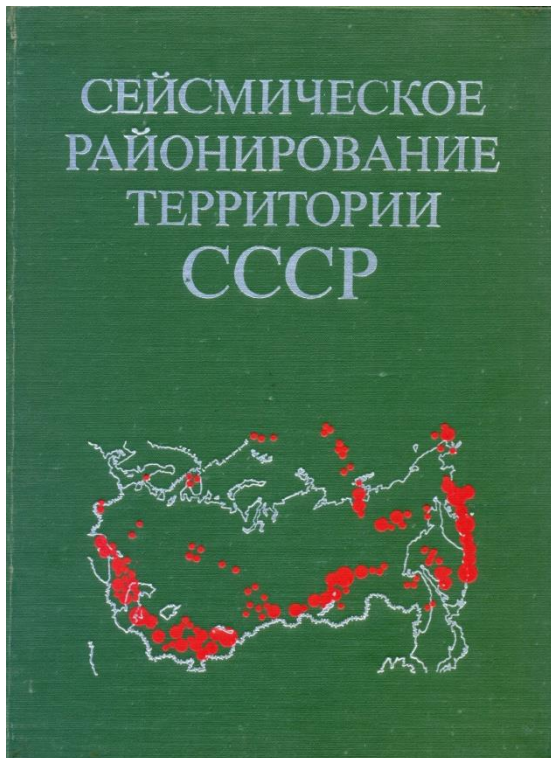
Оценивание сейсмических воздействий в зонах с умеренной и слабой сейсмичностью на основе изучения параметров колебаний грунта в районах с высокой сейсмичностью

Использование акселерограмм общей базы данных по сильным движениям (Банка геофизических данных ИФЗ АН СССР) для оценки параметров сейсмических воздействий в конкретном регионе

Пересчет акселерограмм сильных движений на различные грунтовые условия (метод тонкослоистых сред, слабая нелинейность)

Уравнение макросейсмического поля Блейка-Шебалина

$$I = aM_s - b \lg(H^2 + R^2)^{0,5} + c$$



Москва, Наука, 1980



Москва, Наука, 1988

Сейсмический район	Коэффициенты		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Калининградская область	1,4	2,7	3,4
Северный Кавказ	1,6	3,1	2,2
Дагестан	1,5	3,6	3,1
Прибайкалье	1,5	4,0	4,0
Камчатка	1,5	2,6	2,5
Курильские острова	1,5	4,5	4,5
Сахалин	1,6	4,3	3,3

Пр и м е ч а н и е – Значения коэффициентов могут различаться в различных направлениях

Метод сейсмических жесткостей (МСЖ)

[Медведев, 1962]

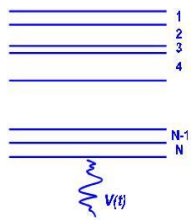
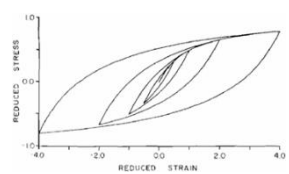
1. В 1960-70-х исследования динамического поведения грунтов стали приоритетным направлением научных исследований в США, где в то время приступили к строительству сети атомных станций



**Анкоридж:**  
27 марта 1964,  
M = 9.1

**Ниигата:**  
16 июня 1964,  
M = 7.5

Методы расчета отклика грунта (1970-80-е):  
**эквивалентный линейный анализ:** SHAKE, QUAD-4, FEADAM, LUSH, FLUSH, FDEL,...  
**нелинейный анализ:** DESRA, TARA, CHARSOIL, TESS1, MASH, NONLI3,...



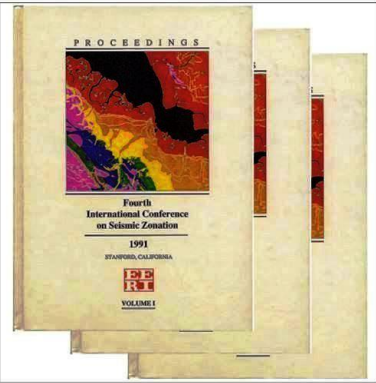
**Hardin, Drnevich, 1972**

# Успехи сейсмологии последних десятилетий нашли отражение в строительных нормах США, Японии, стран Евросоюза

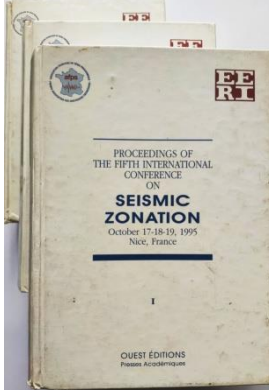
2. После катастрофического землетрясения в Кобе 17 января 1995 в Японии развернуты сети сильных движений **K-NET** – более 1000 наземных акселерометров и **KiK-net** – более 700 вертикальных групп

The screenshot shows the NIED website interface. At the top, there are navigation tabs: Top, Introduction, Download, Topics, User info, Manual, Links. Below this is a section for 'Important Announcement' stating that the website is unified for K-NET and KiK-net. There are sections for 'For First-time Visitors' and 'Link to Realtime ground-motion monitoring system (Kyushin monitor)'. The 'For First-time Visitors' section includes links for 'About Strong-motion Seismograph Network (K-NET, KiK-net)', 'About User Registration', and 'Easy Download'. The 'Link to Realtime ground-motion monitoring system' section lists two systems: '1. Realtime ground-motion monitoring system' and '2. New Realtime ground-motion monitoring system (Test operation)'. The bottom part of the screenshot shows a map of Japan with a red star indicating the location of the earthquake, and a graph showing seismic data.

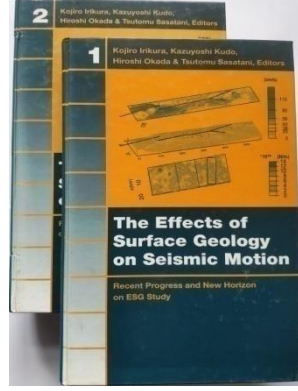




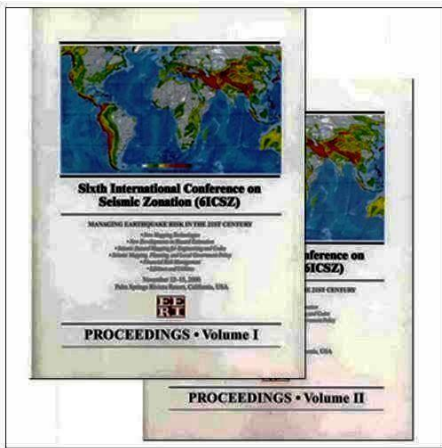
1991



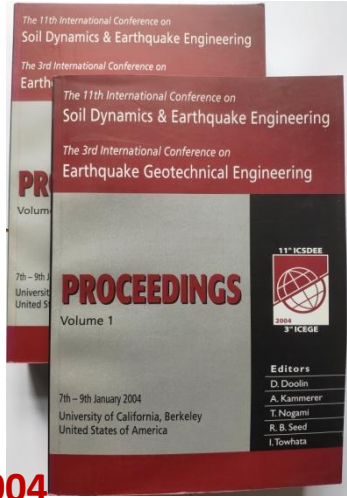
1995



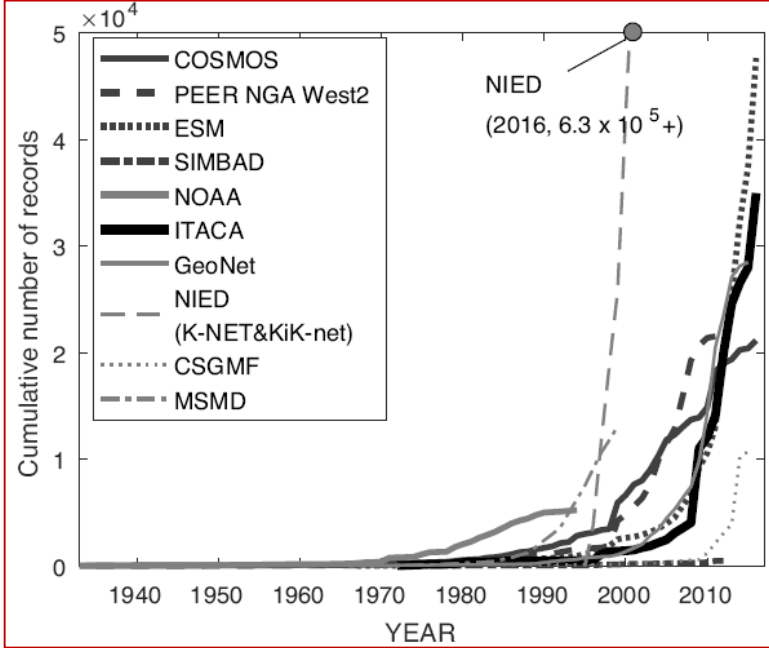
1998



2000



2004



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

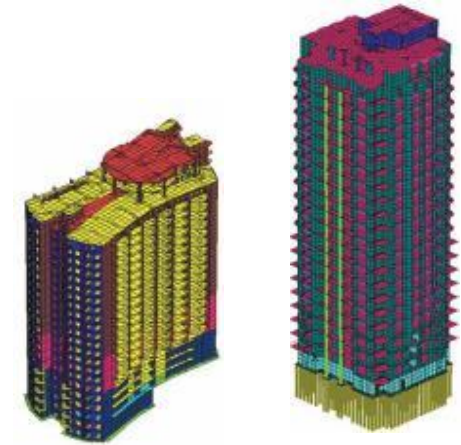
**4-th International Conference on Seismic Zonation, Stanford, California, USA, 1991**

**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**



«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.*

В спектр колебаний в данной точке  $Y$  дают вклад очаг  $E$ , путь  $P$  и локальные эффекты  $G$ :

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) P(R, f) G(f)$$

где  $M_0$  - сейсмический момент,  $R$  - расстояние от источника, и  $f$  - частота (Boore, 2003)

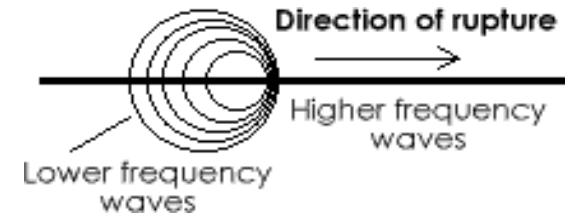


### Механизм очага

Азимут, наклон, глубина и размеры разломной плоскости

Моментная 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



**Характеристики очага и пути распространения имеют региональные особенности**

# МОДЕЛИ ОЧАГА:

детерминистские

стохастические

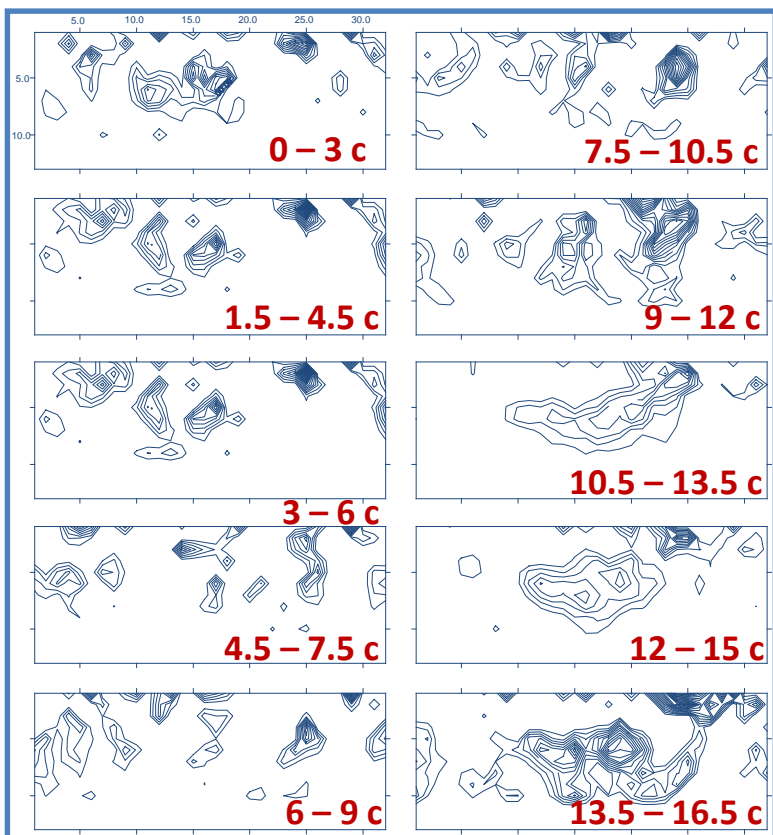
**Колебания поверхности** при землетрясении - результат пространственно-временной конволюции функции подвижки в очаге с функцией Грина, представляющей отклик земной среды (Аки, Ричардс, 1980)

**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  $\Delta\sigma$

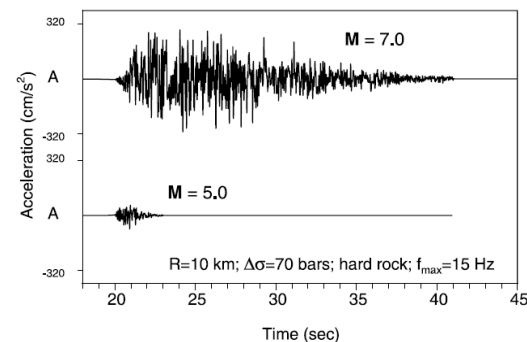
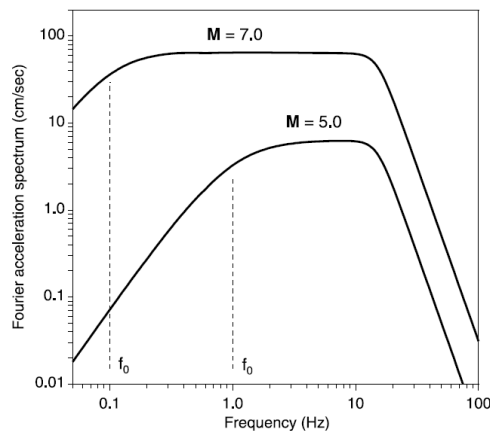
Обратная задача: (Kikuchi, Kanamori, 1982; Ruff, Kanamori, 1983; Archuleta, 1984; Hartzell, Heaton, 1985, 1986; etc.)

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

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



Землетрясение в Чи-Чи (Тайвань) 1999

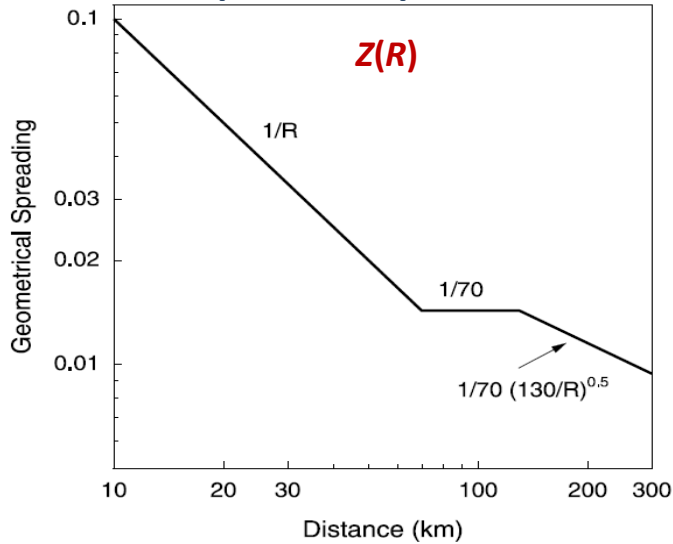


$\Delta\sigma$  зависит от региона,  $M$ , типа подвижки, глубины очага,..

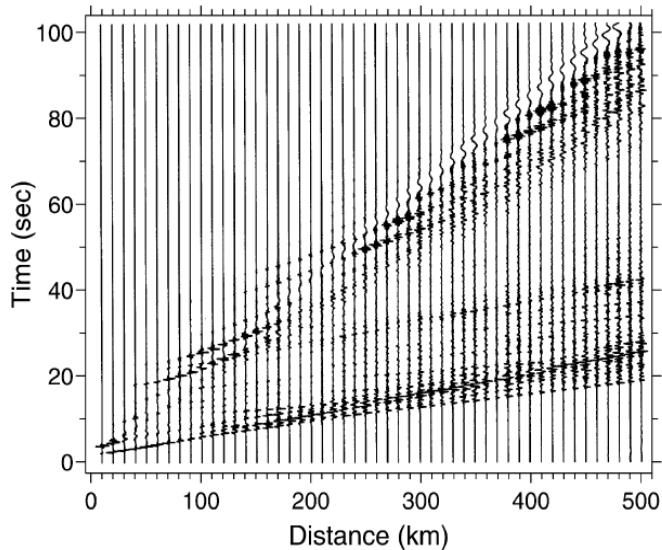
**Модель  $\omega^2$**  (Аки, 1967; Hanks, McGuire, 1981) широко используется как основа для предсказания амплитудных спектров и пиковых скоростей сильных движений в инженерных приложениях



## Геометрическое расхождение



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



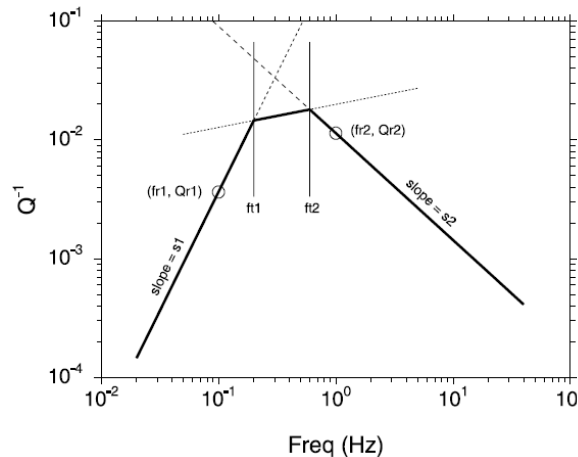
## ЭФФЕКТЫ ПУТИ $P(R, f)$

Могут быть описаны простыми функциями для учета:

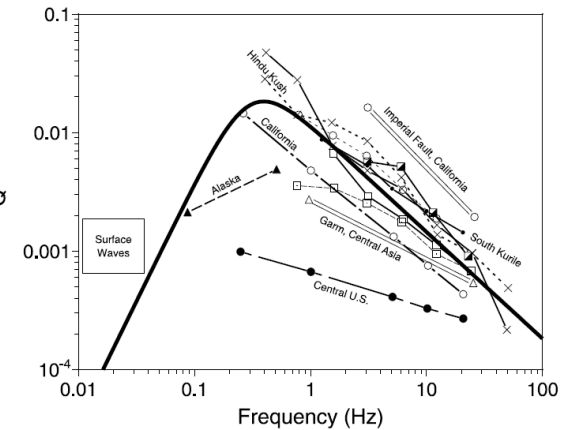
- геометрического расхождения волн,
- затухания (неупругого поглощения и рассеяния)
- увеличения длительности сигнала с расстоянием из-за эффектов распространения и рассеяния

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

Неупругое поглощение и рассеяние  $Q(f)$  может быть оценено по записям слабых землетрясений



аппроксимация простыми функциями



по результатам исследований

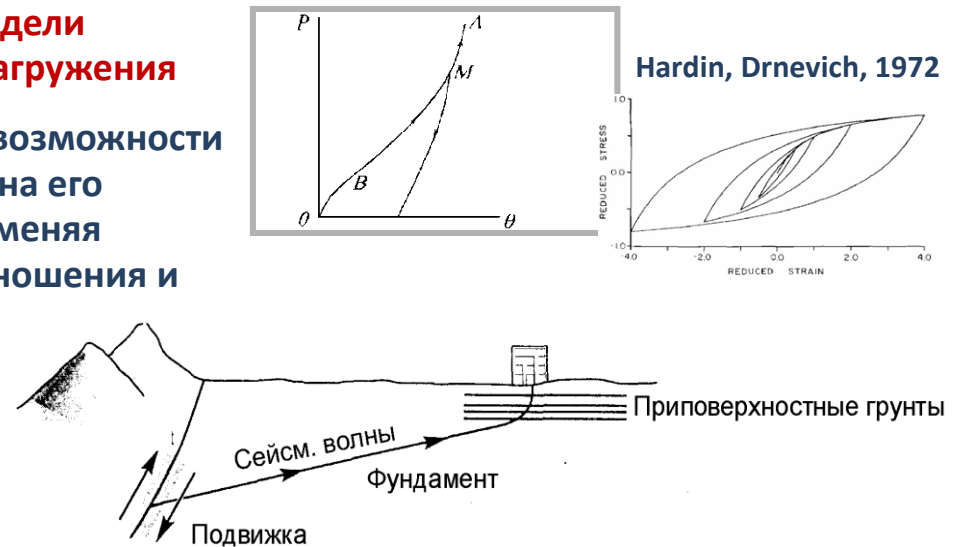
Синтетические сейсмограммы для 4-слойной модели коры в центральных США: реверберация в земной коре (Herrmann, 2000)

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

## 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**
- ❑ При расчете отклика грунта нужно стараться по возможности наиболее полно учесть все факторы, влияющие на его напряженно–деформированное состояние, применяя теоретические положения и эмпирические соотношения и параметры

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



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

- ❑ **Переход сейсмических волн в верхние слои с меньшими значениями  $V_s$  и  $\rho$  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**

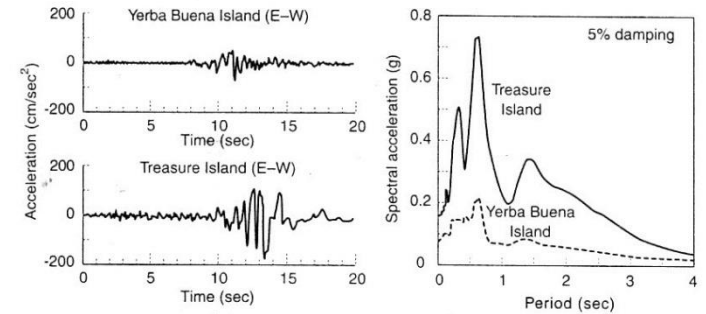
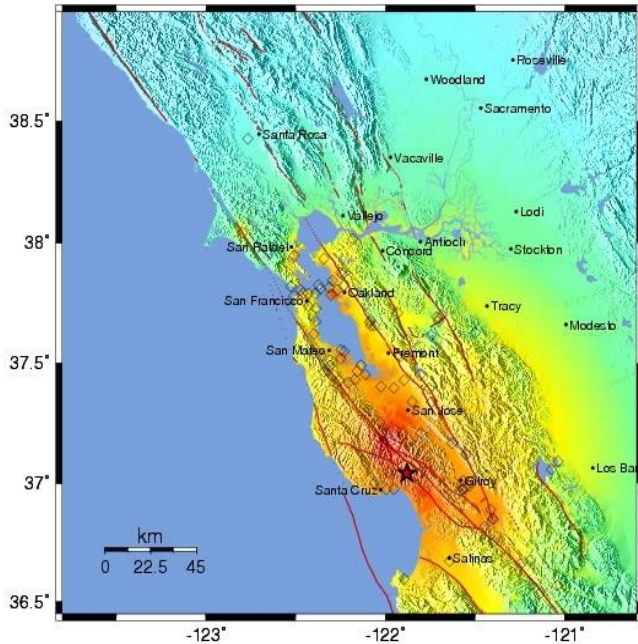
Эквивалентный линейный анализ: **SHAKE, QUAD-4, FEADAM, LUSH, FLUSH, FDEL,...**

Нелинейный анализ: **DESRA, TARA, CHARSOIL, TESS1, MASH, NONLI3,...**

# 1. Усиление сейсмических волн в грунтовых слоях

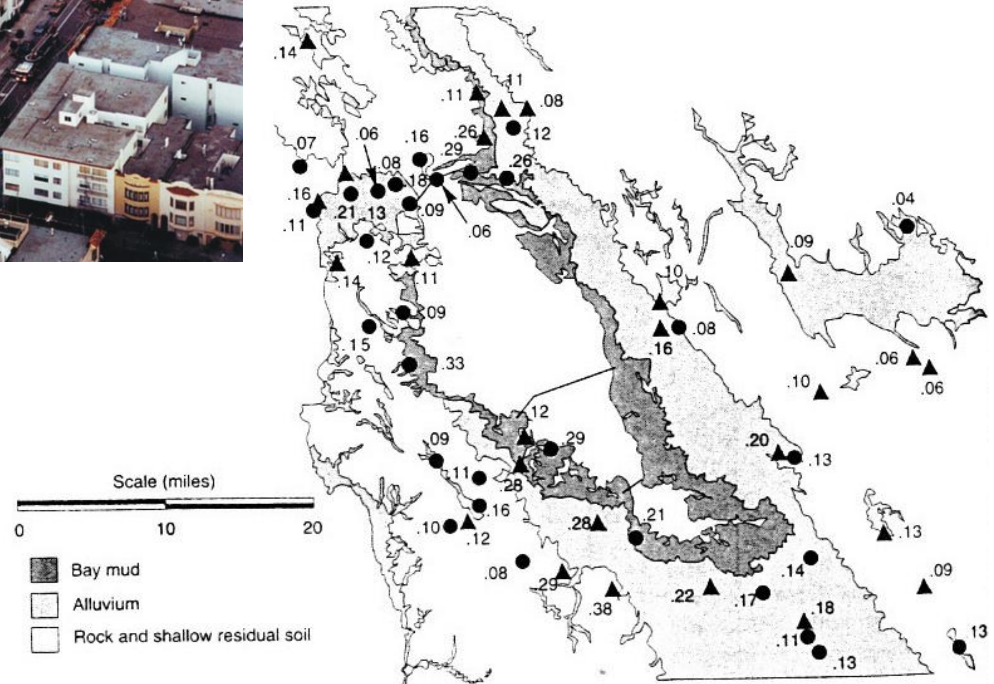
## Землетрясение 17 октября 1989 г. в Лома Приета (США) ( $M \sim 7.1$ , $r \sim 100$ км)

MMI ShakeMap for the 1989 earthquake determined from seismic recordings



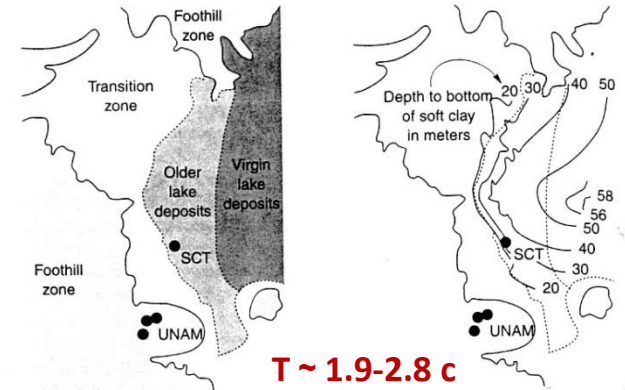
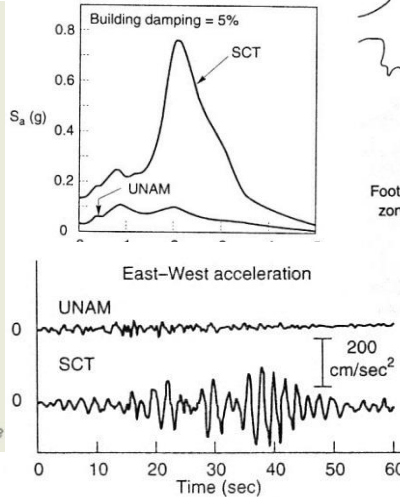
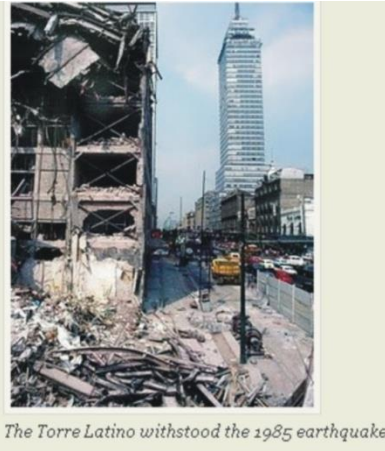
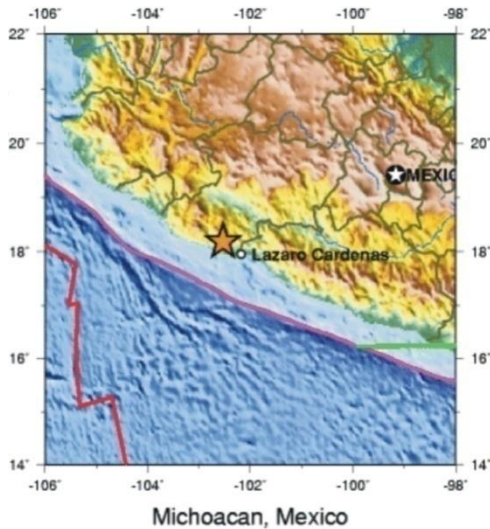
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. (g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL. (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16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

Сильные разрушения в одних районах и отсутствие разрушений в других



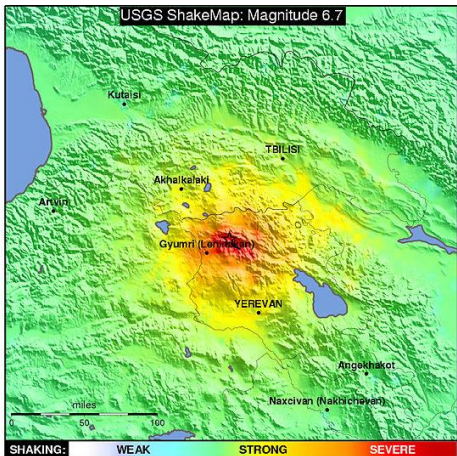
## 2. Резонансные явления в грунтовых слоях: двойной резонанс, в грунтах и в зданиях

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



### 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 ~ N/10 c



Разрушены более 300 населенных пунктов: Спитак, Ленинакан, Степанаван, Кировакан и др.;

Погибло более 25 000 человек

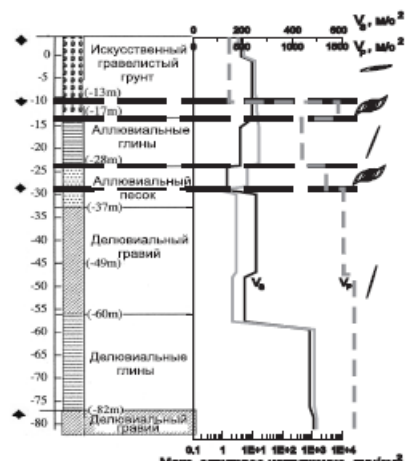
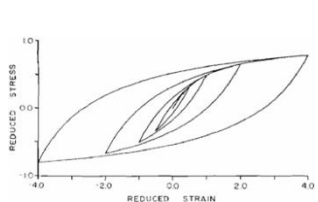
В Ленинакане разрушены здания, периоды собственных колебаний которых ~ 0,3 – 0,9 с совпали с периодами собственных колебаний подстилающих грунтов - суглинков с туфами и супесями **h ~ 20-70 м**



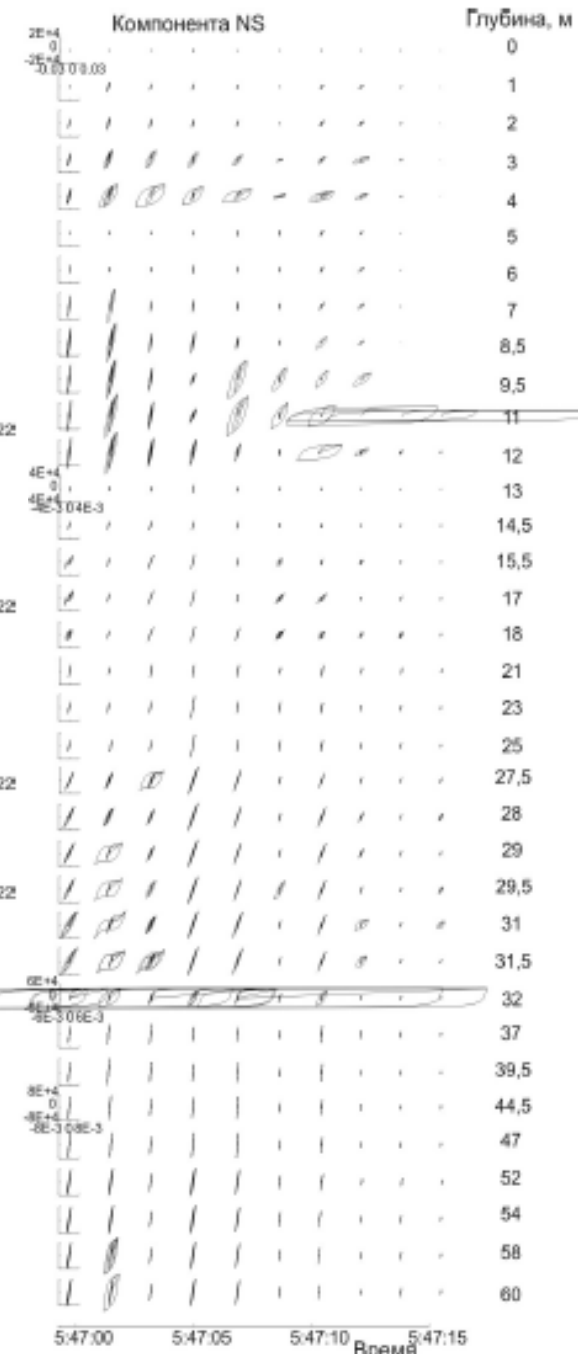
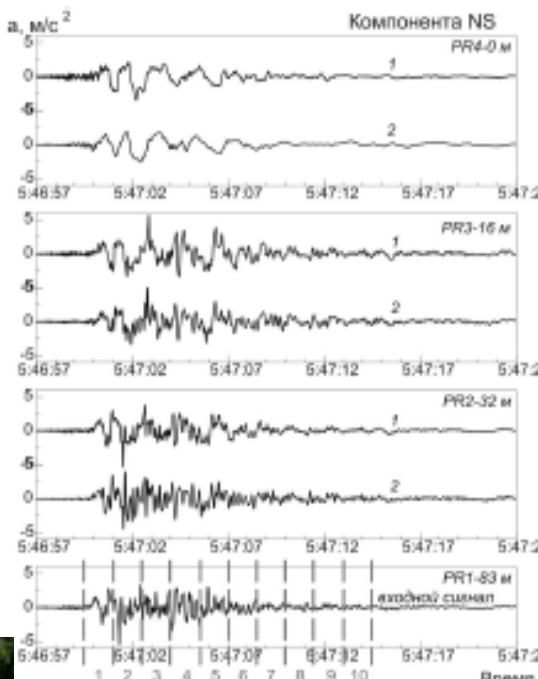
«Тройной эффект» (Б.К. Карапетян, предс. Пробл. совета по сейсмологии и сейсм. строительству АН АрмССР):

ослабленный грунт (из-за активного строительства) + резонанс в грунтах и в зданиях + плохое качество строительства

### 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

# Входные данные программы стохастического моделирования D. Boore (1983)

rho, beta, pritin, 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)

$\Delta\sigma = 50$  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>**

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  **$D$ , км**  
 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

$Q(f) = 117 \cdot f^{0.77}$  (Chen, Shin, Wang, 1989)

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

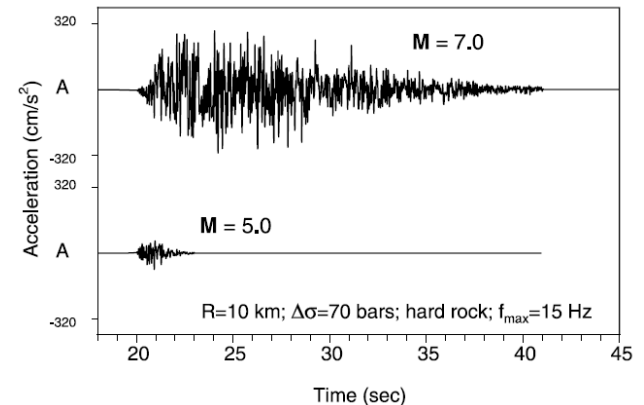
site amplification: namps, (famp(i), amp(i))  
 4

**Локальное усиление  
 в земной коре**

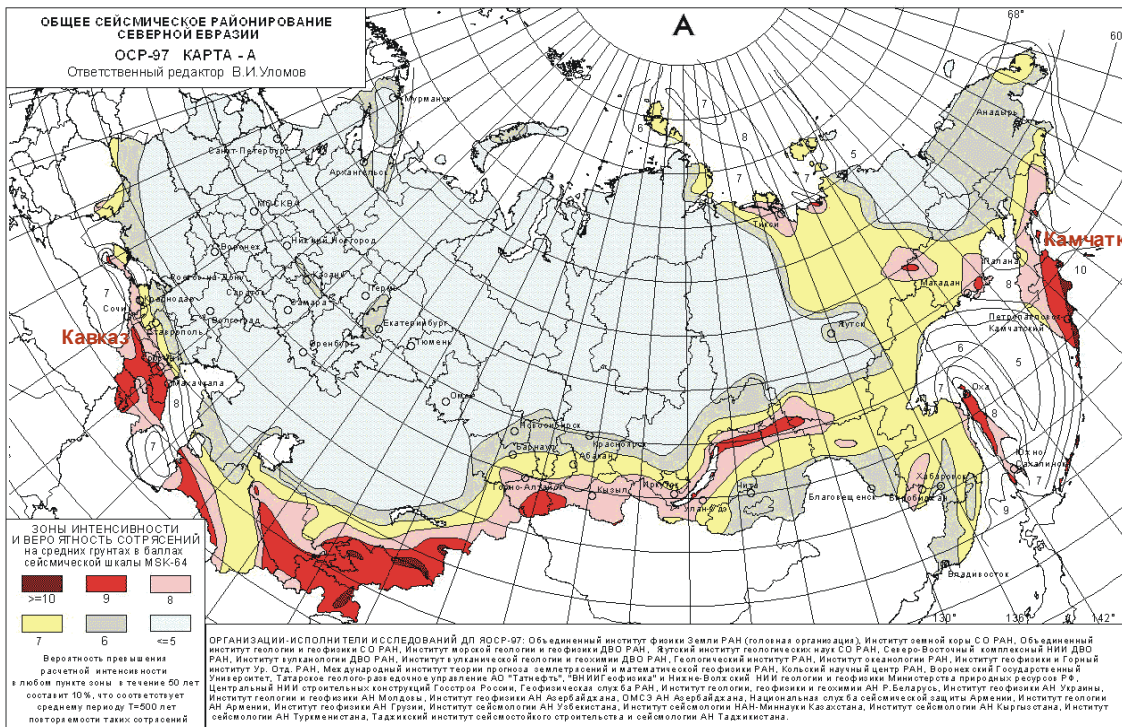
0.01	1.00
0.16	1.18
2.26	2.06
6.05	2.58

site diminution parameters: fm,  **$\kappa$** , 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

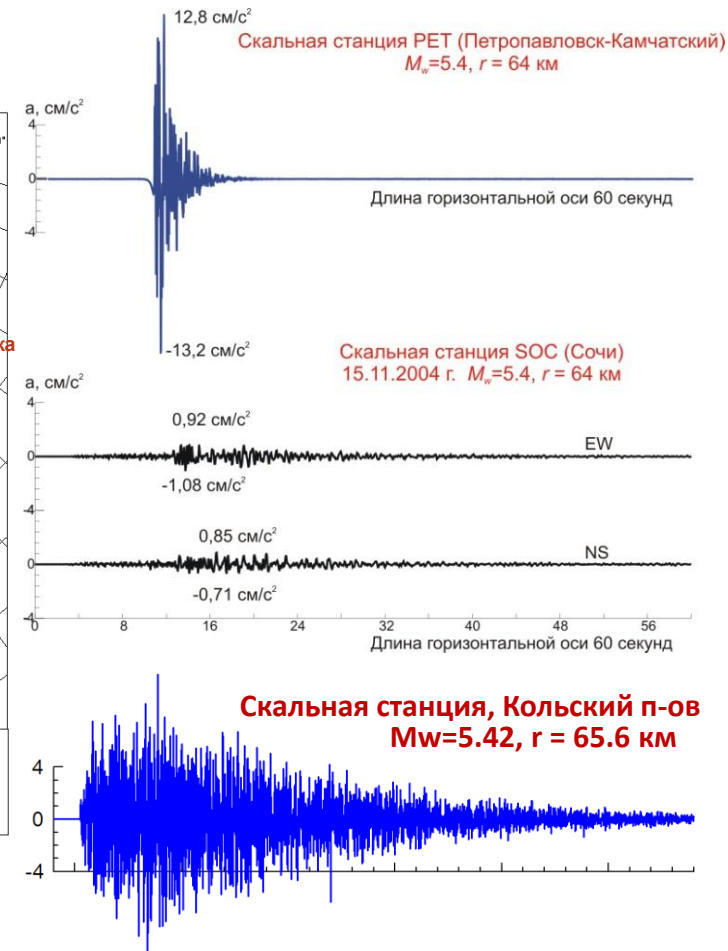
**Акселерограммы на скале,  
 без учета отклика грунта**



# Различия региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на территории России: нет единой формулы связи балла с пиковым ускорением

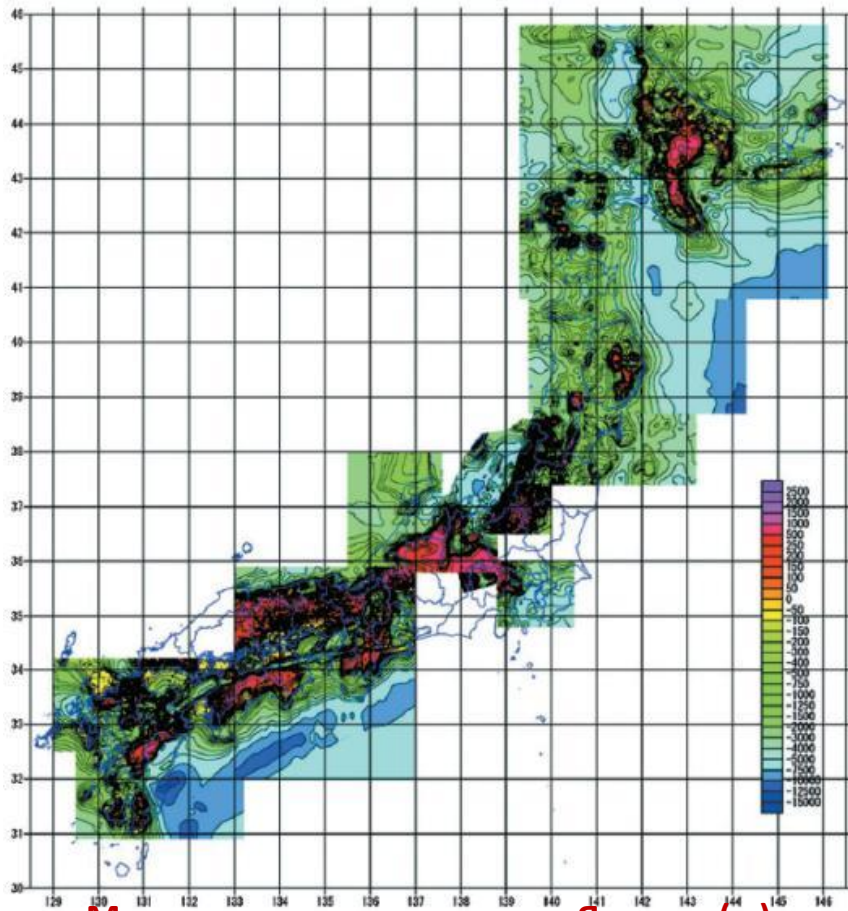


Доклады АН, 2011, 438, 5, 687-693



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

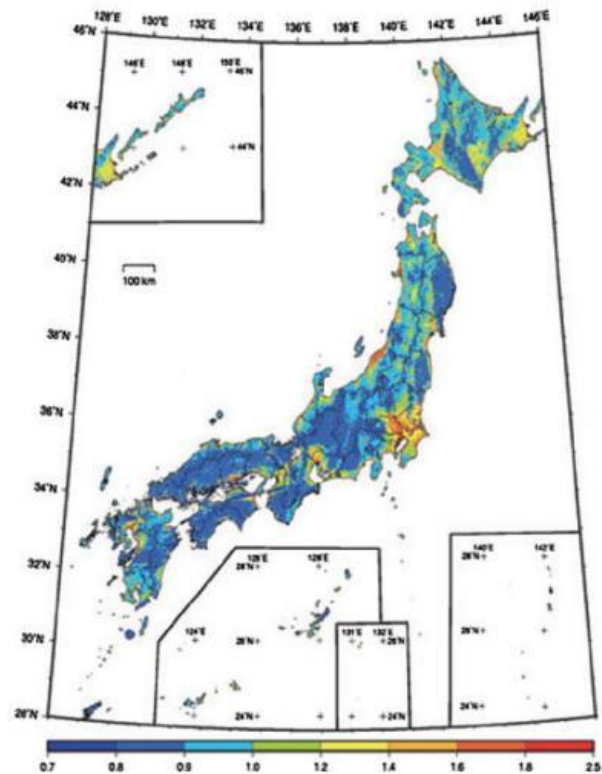
**Камчатка – Кавказ – в 10-15 раз**



**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)

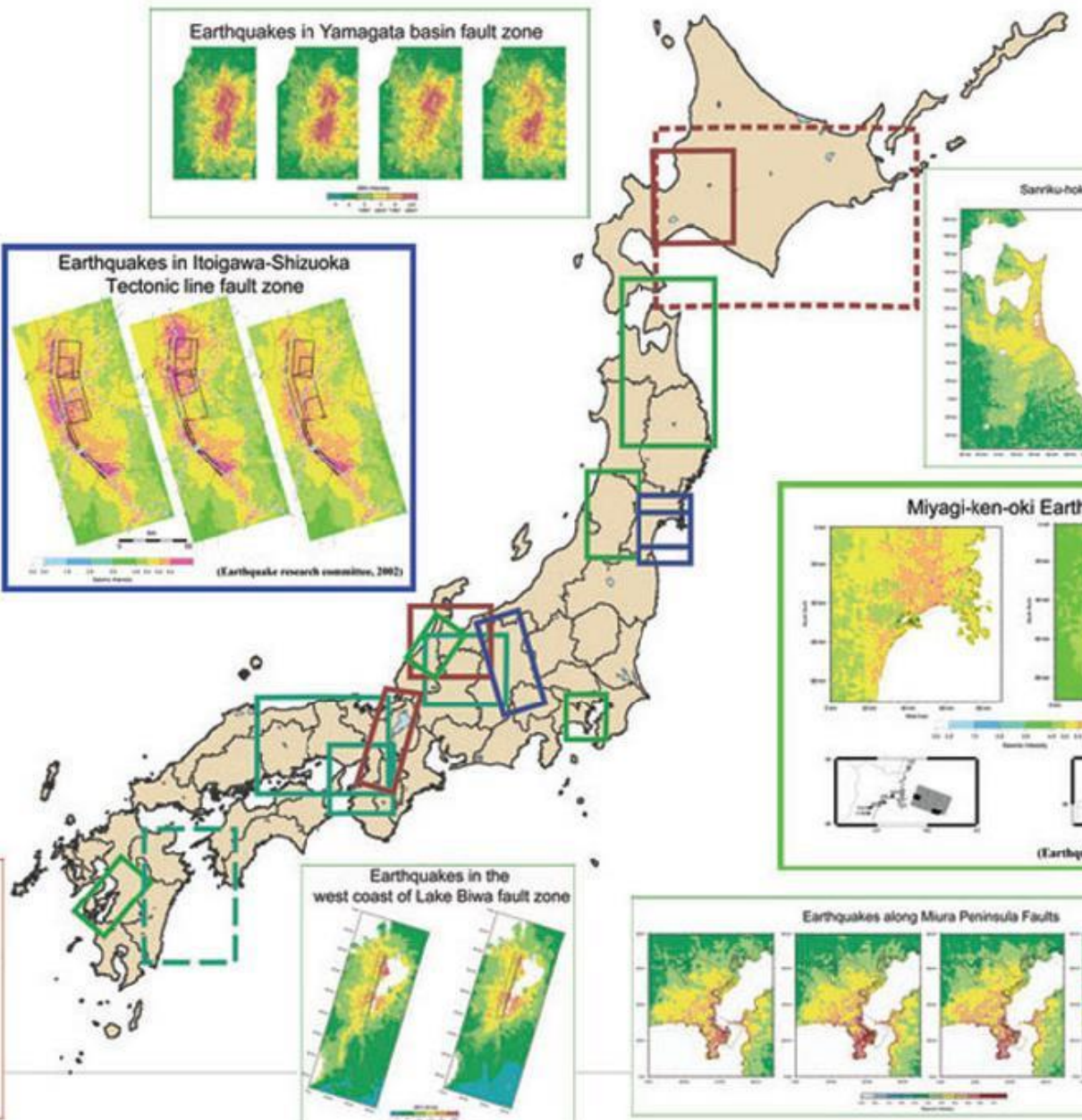
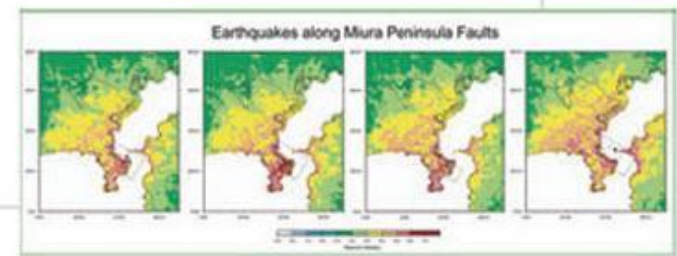
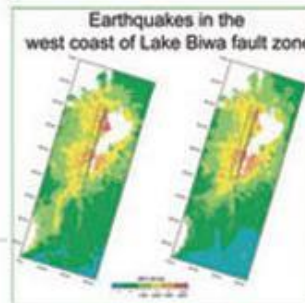
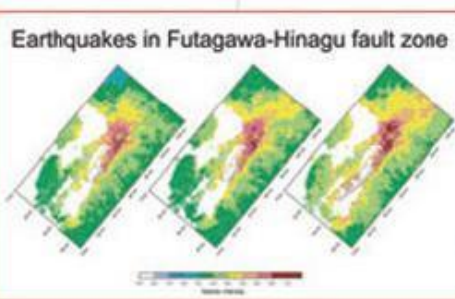
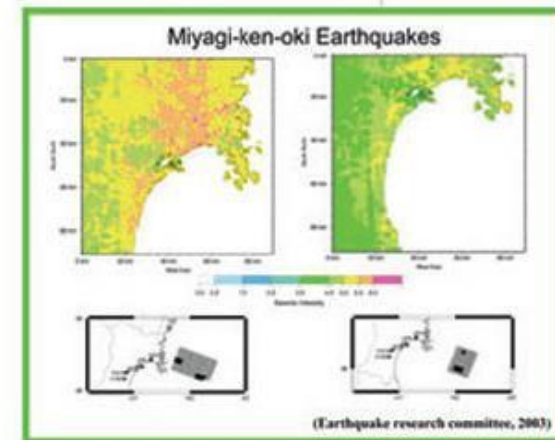
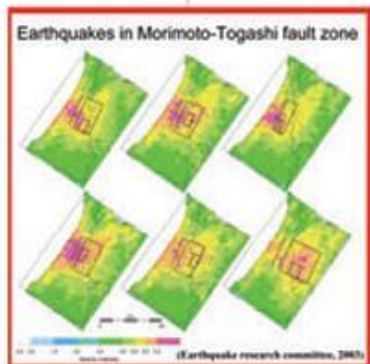
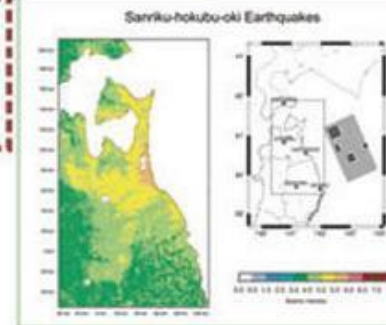
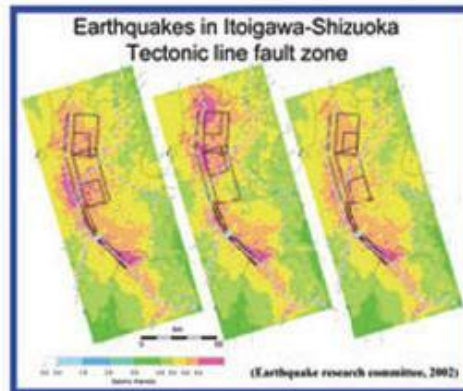
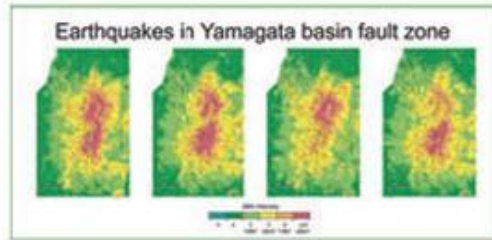
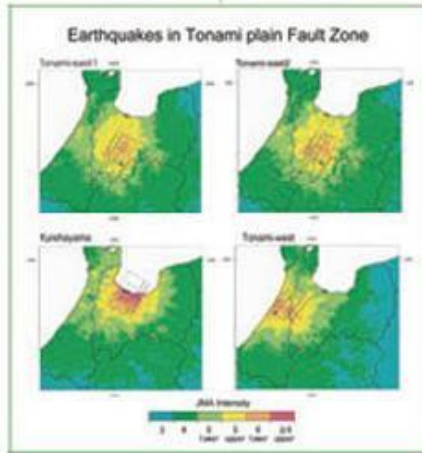


**Коэффициенты усиления сейсмических волн в грунтах по данным поверхностной геологии и геоморфологии**

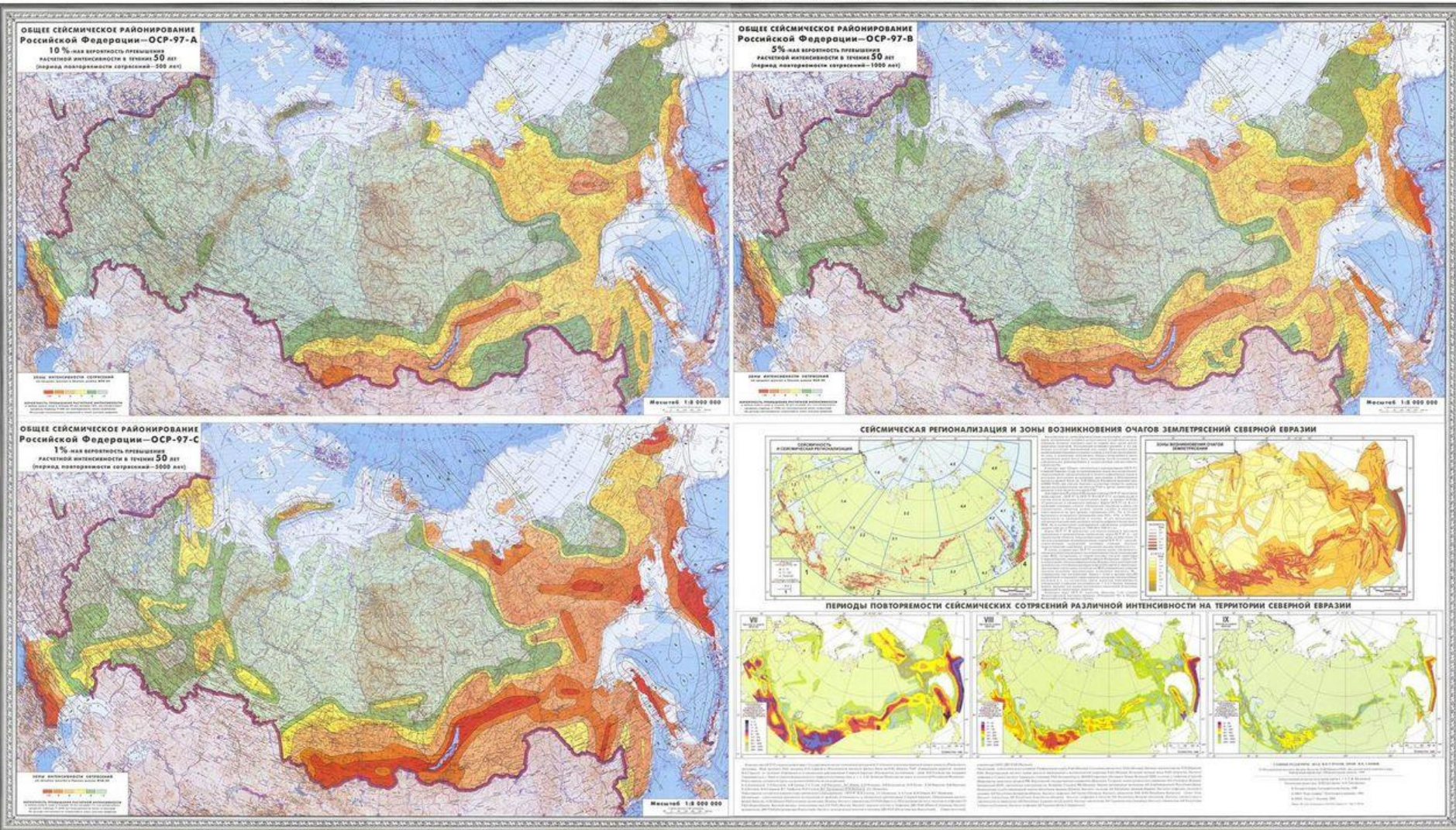


# Япония: Рассчитываются сильные движения при сценарных землетрясениях (SESM)

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



# СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Вероятностные карты нового поколения ОСР-97 для периодов повторяемости землетрясений 500, 1000 и 5000 лет

# Пространственное распределение грунтовых толщ на территории России

Инженерная геология России т. 1 Грунты России. ред. В.Т. Трофимов, Е.А. Вознесенский, В.А. Королев. М., 2011

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



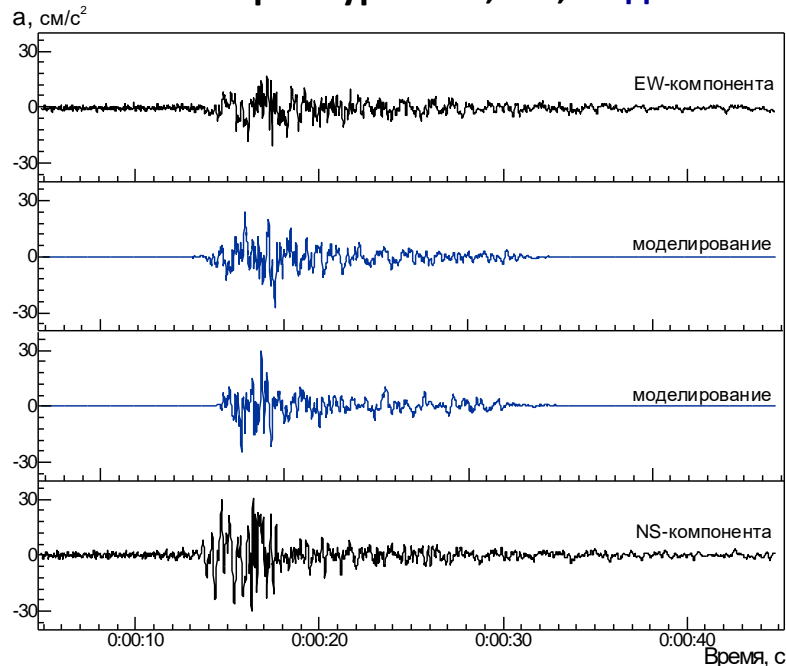
**11 типов наиболее представительных по площади развития грунтов:**

1 – преим. 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

I – слабоувлажненные, II – увлажненные, III – сильноувлажненные, IV – льдистые, V – сильнольдистые, VI – льдистые и увлажненные, VII – сильноувлажненные, льдистые и сильнольдистые, VIII, IX, X – границы распространения

# Акселерограммы землетрясения 13.11. 1993 на ст.

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



# Курило-Камчатская зона (субдукционные землетрясения)

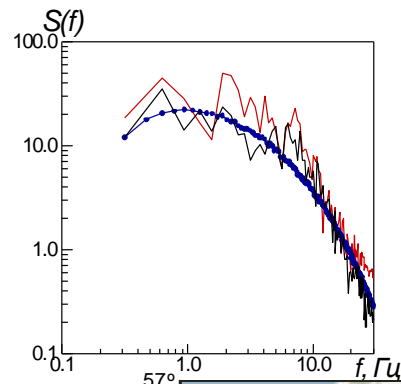
## Землетрясения 1992-1993 гг.

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

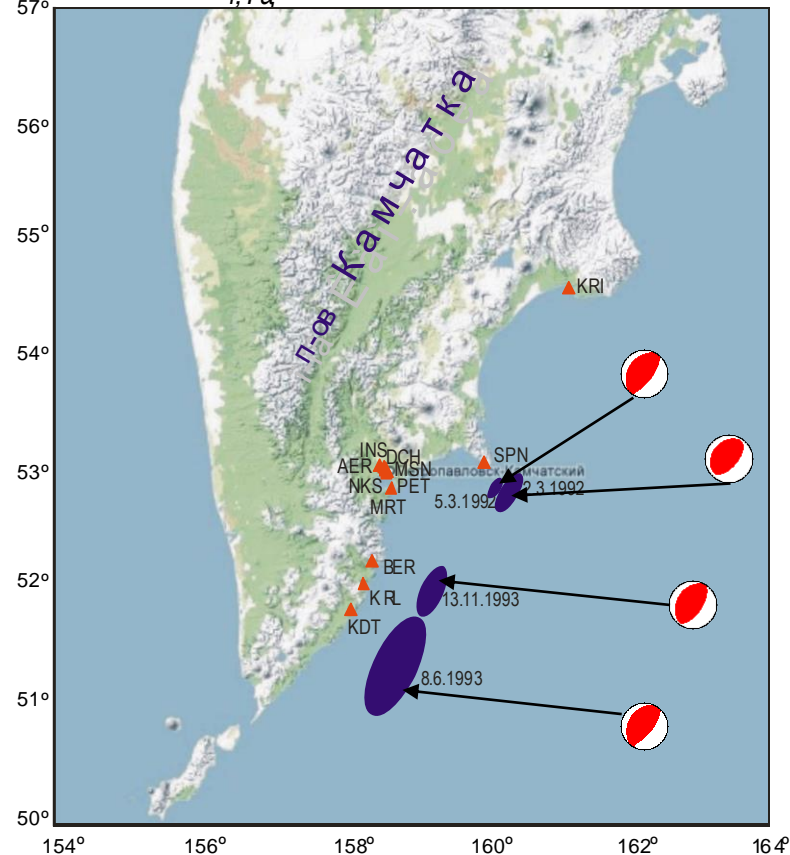
**5.03.1992** ( $M_w = 6.3$ ,  $h = 52$  км)

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

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

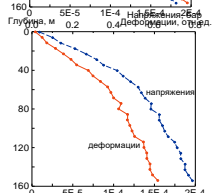
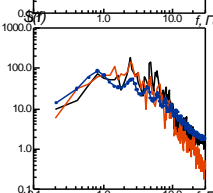
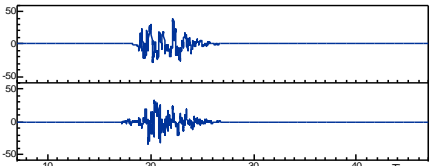
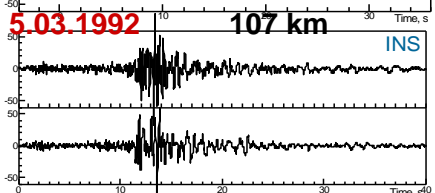
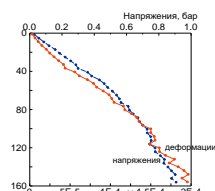
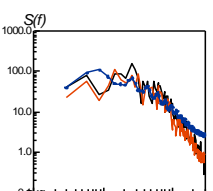
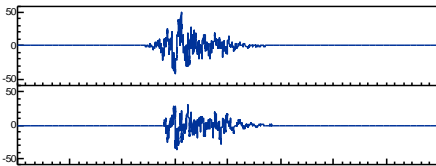
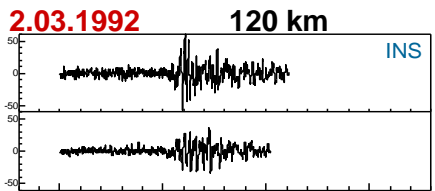
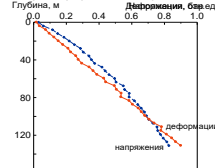
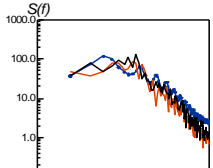
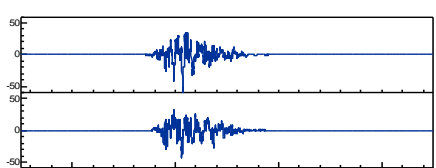
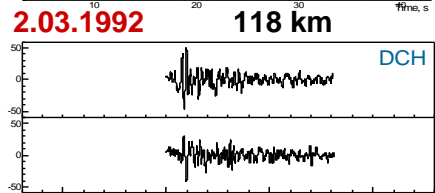
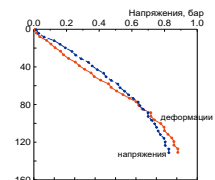
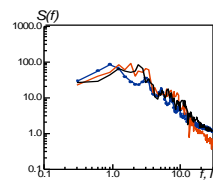
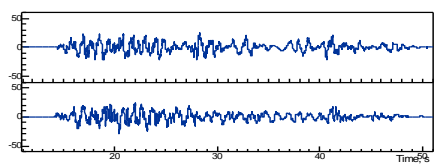
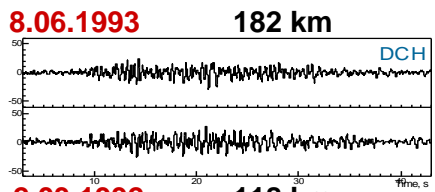
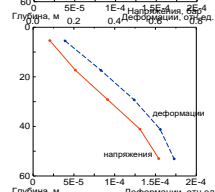
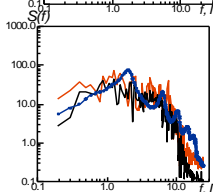
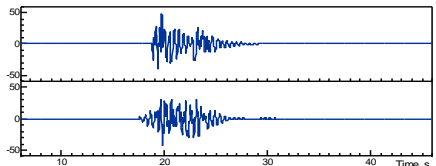
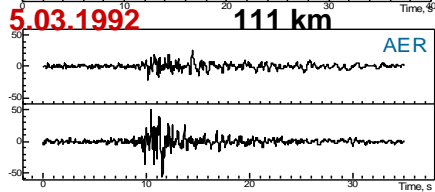
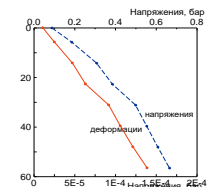
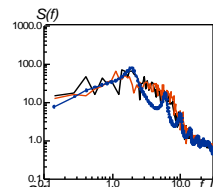
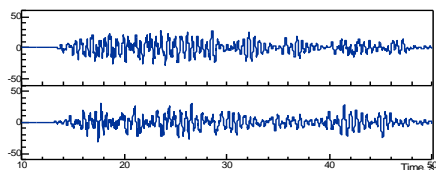
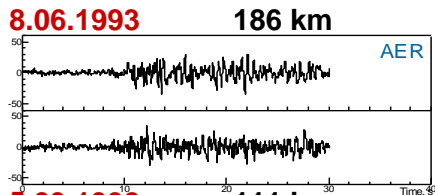


Координаты и глубина эпицентра	52.0° с.ш., 159.27° в.д., 54.2 км
Размеры разломной плоскости	90 км x 30 км
Ориентация разломной плоскости	азимут 206°, падение 31°
Параметр напряжения $\Delta\sigma$	100 бар
Локальное усиление в коре $A(f)$	$\sim 2-2.5$ на $f \sim 10-20$ Гц
$Q(f)$	$180 \cdot f^{0.7}$
Параметр 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>

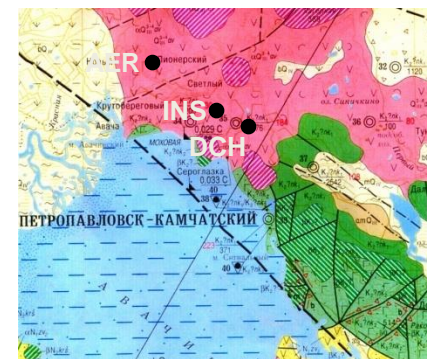


# “Грунтовые” станции AER, DCH, INS

	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).



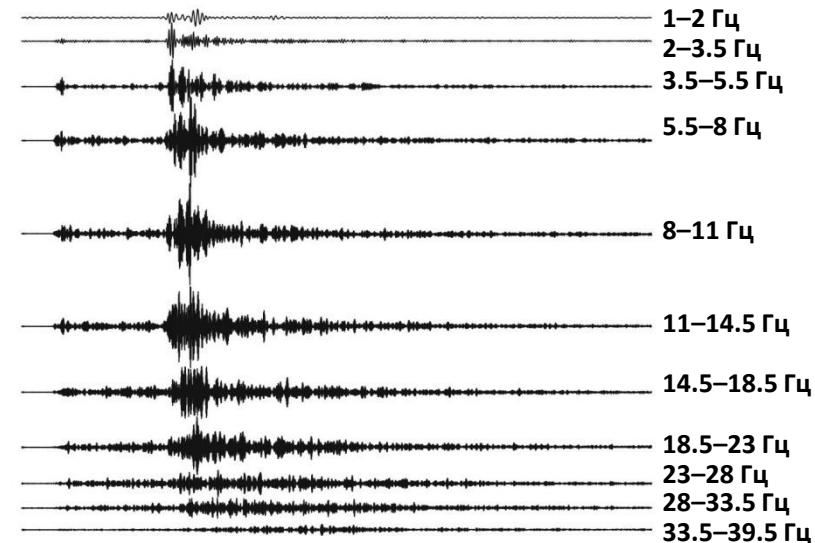
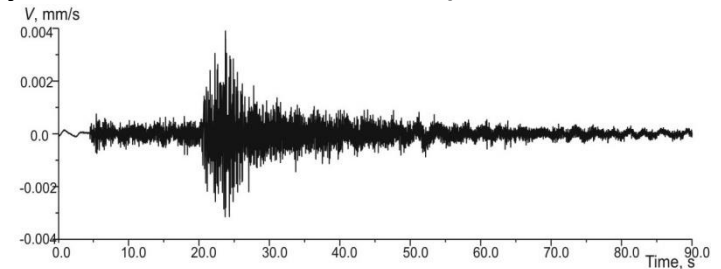
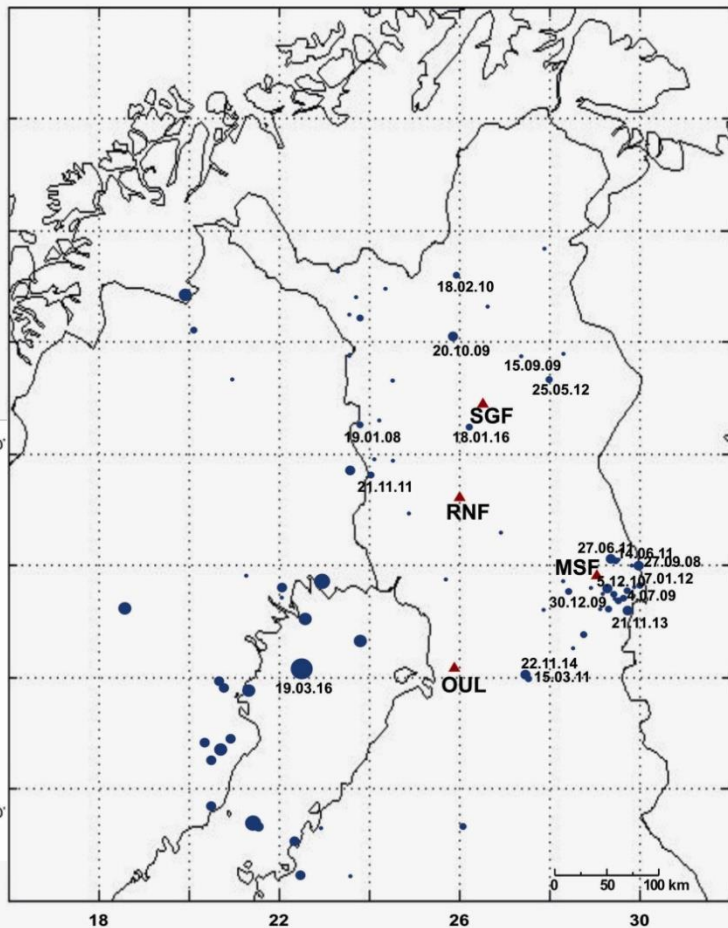
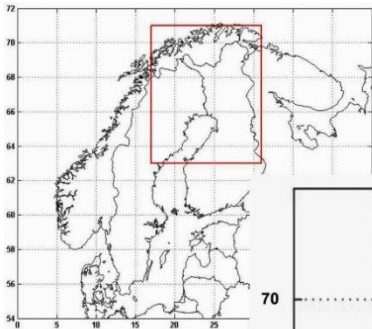
Происхождение грунтов объясняет их однородность

# 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)

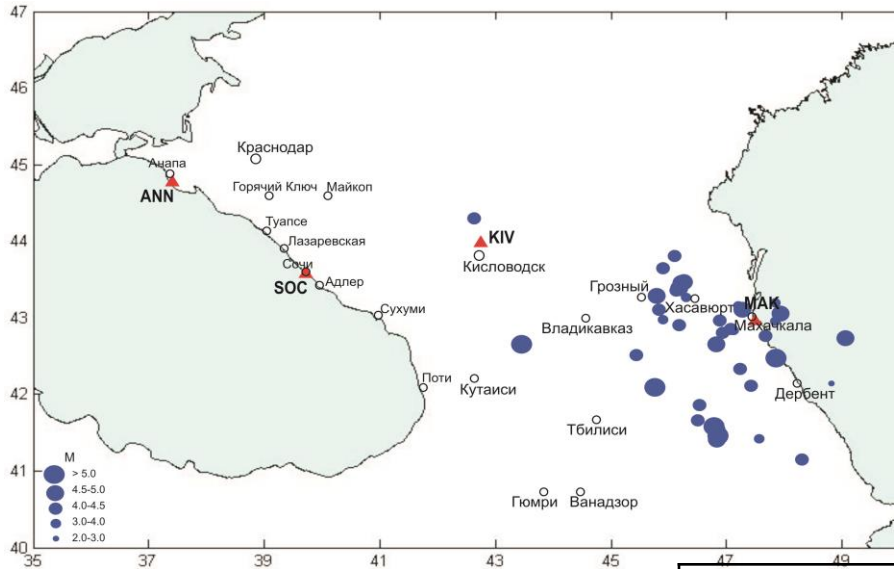
## Сейсмическая сеть Финляндии



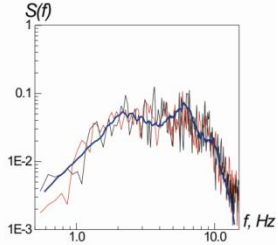
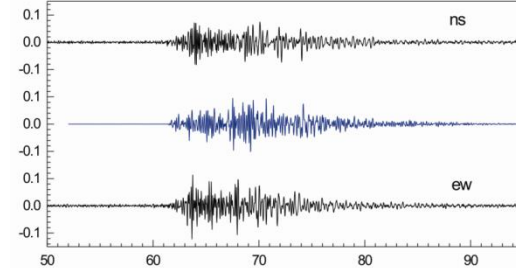
Велосиграмма землетрясения  
30.12.2009  $M=2.2$  ст. OUL  $r = 137.5$  км  
и результаты ее полосовой фильтрации

# Северный Кавказ (коровые землетрясения)

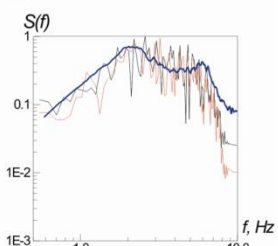
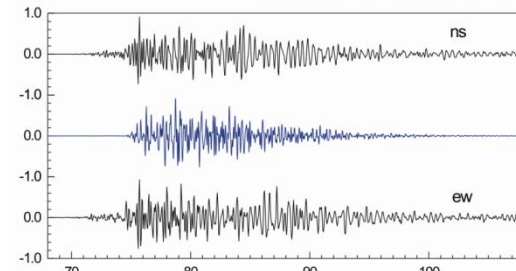
Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн



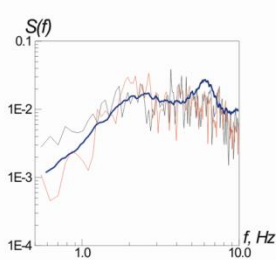
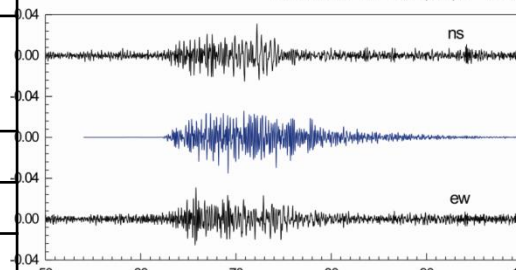
4.02.2013 M ~3.2 (3.7), r ~28.8 km



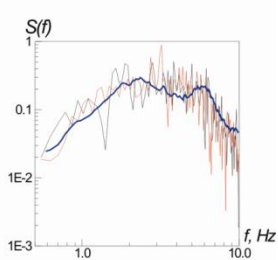
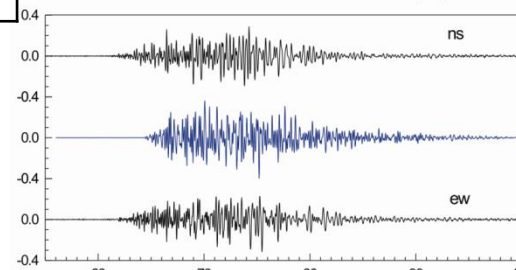
30.01.2009 M ~4.1 (3.8, 4.5), r ~29.5 km



18.10.2007 M ~2.9 (3.7), r ~31.0 km



5.07.2009 M ~3.8 (4.1), r ~31.3 km



Восточная часть:

$$\Delta\sigma \sim 50 \text{ бар}$$

$$1/R \text{ при } R < 50 \text{ км}$$

$$1/50 \text{ при } 50 \leq R < 150 \text{ км}$$

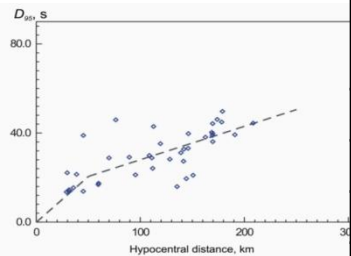
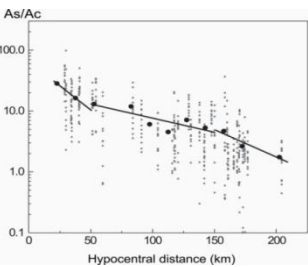
$$1/R^{0.5} \text{ при } R > 150 \text{ км}$$

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

$$A(f) \sim 1.0$$

$$k \sim 0,08 \text{ с}$$

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

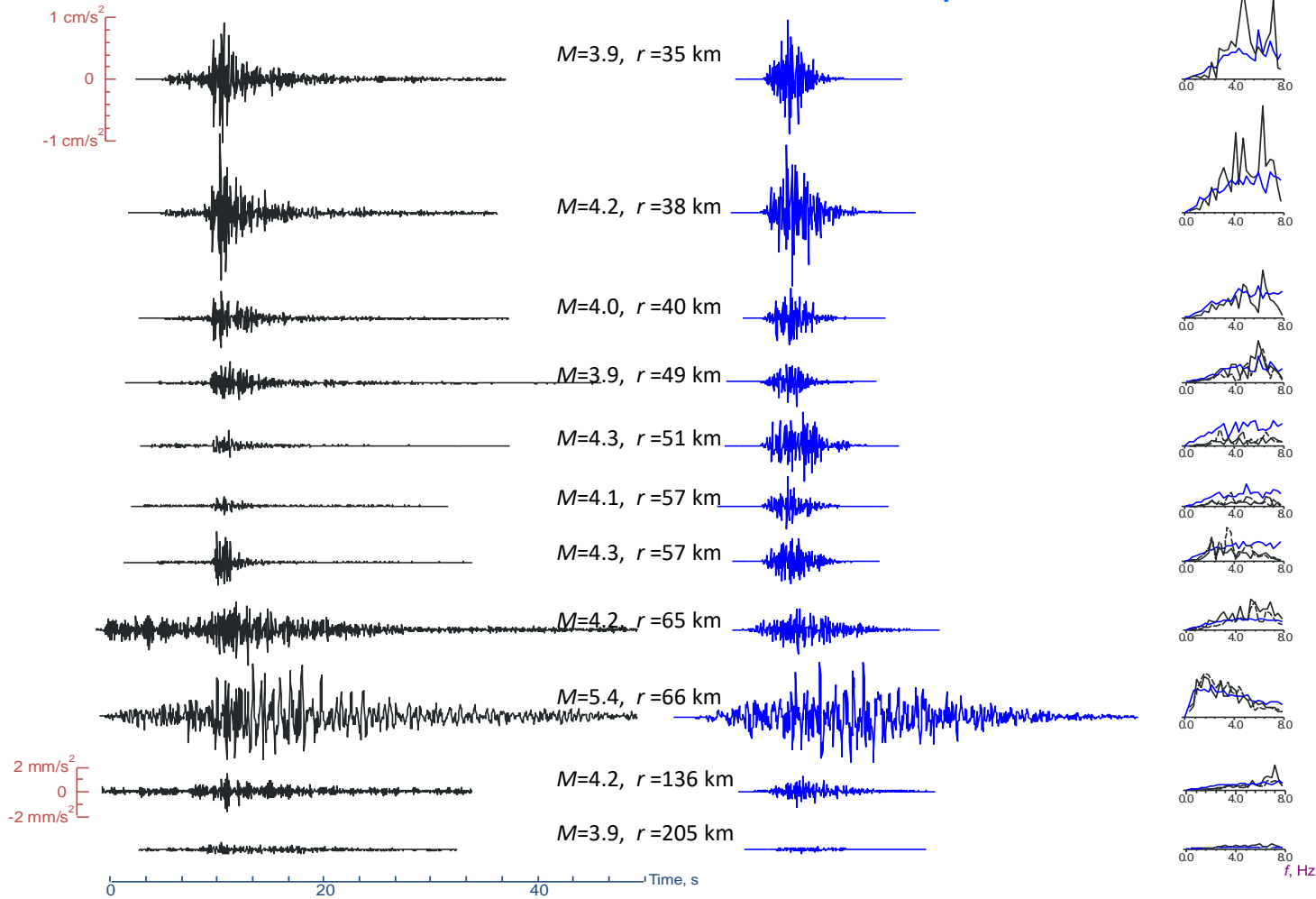


- Кирсанов В.И., Павленко О.В. (2019) Оценки добротности коры и верхней мантии Северо-восточного Кавказа по записям сейсмостанции «Махачкала»// Вопросы инженерной сейсмологии 2019. Т 46, № 2, С. 60-73.
- Павленко О.В. (2020) Характеристики поглощения сейсмических волн в восточной части Северного Кавказа, оцененные по записям сейсмостанции «Махачкала», Физика Земли, № 5, с. 36-45.
- Pavlenko O. (2020) Regional characteristics of radiation and propagation of seismic waves in the North-Eastern Caucasus, 2020, Russian Journal of Earth Sciences, 20, pp 1<sup>st</sup>-15

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

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
$3.5$ км/с $2.7$ г/см <sup>3</sup>

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



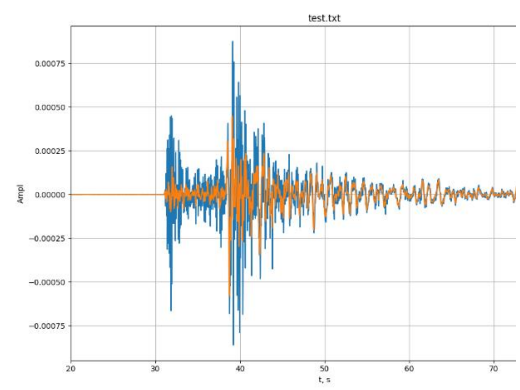
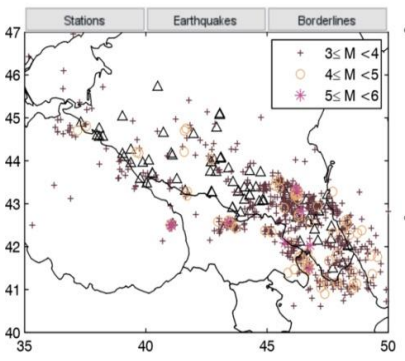
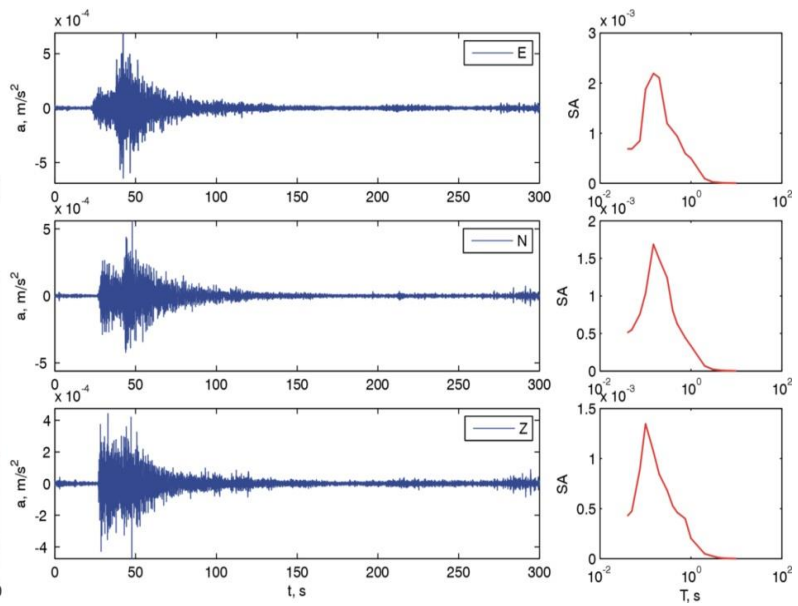
# Система управления базой данных по сильным движениям СУБД

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

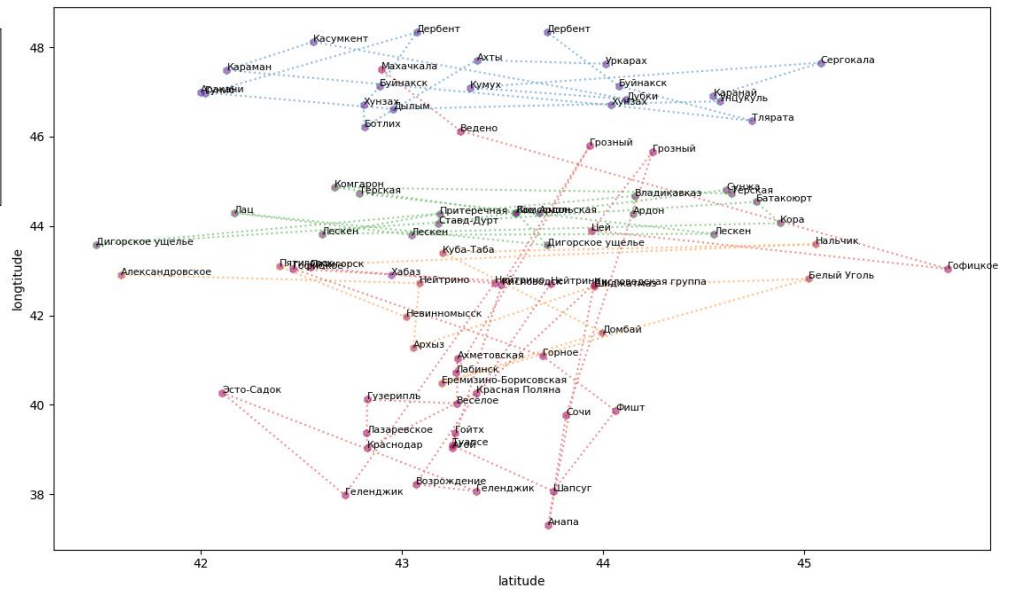
Преобразование «сырых» записей к формату базы данных спектров реакции, с набором характеристик: магнитуд, расстояний и др. для построения уравнений прогноза движений грунта (УПДГ)

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

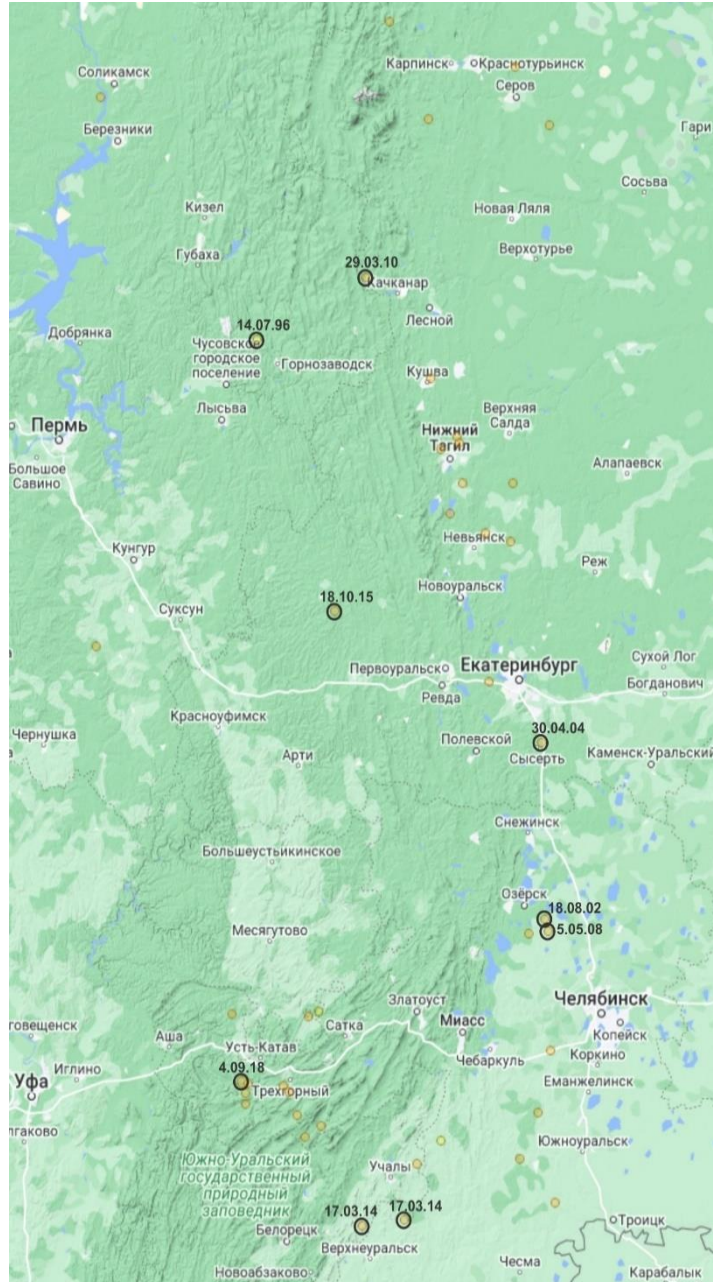
Connect DB	Print to DB	Close DB	
2005-08-24	165809	Lat = 42.90	Lon = 45.70
Depth = 39.0 км	Mag = 4.2	Repi = 119.99 км	Rhyp = 126.30 км
Грунт: Лессовидный суглинок, глина			



- ⊗ DAGSR
- ⊗ KMGSR
- ⊗ NOGSR
- ⊗ OBGSR
- ⊗ SSC

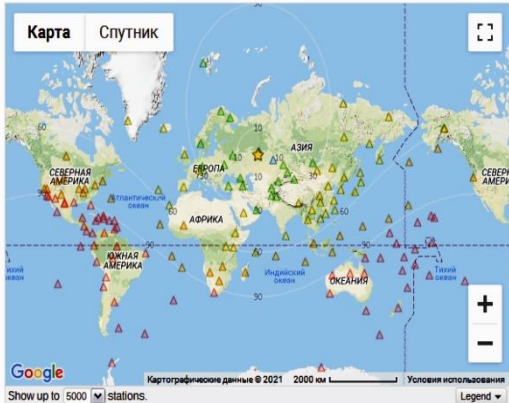


# Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в **Уральском регионе**, уточнение уравнений прогноза движений грунта



	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

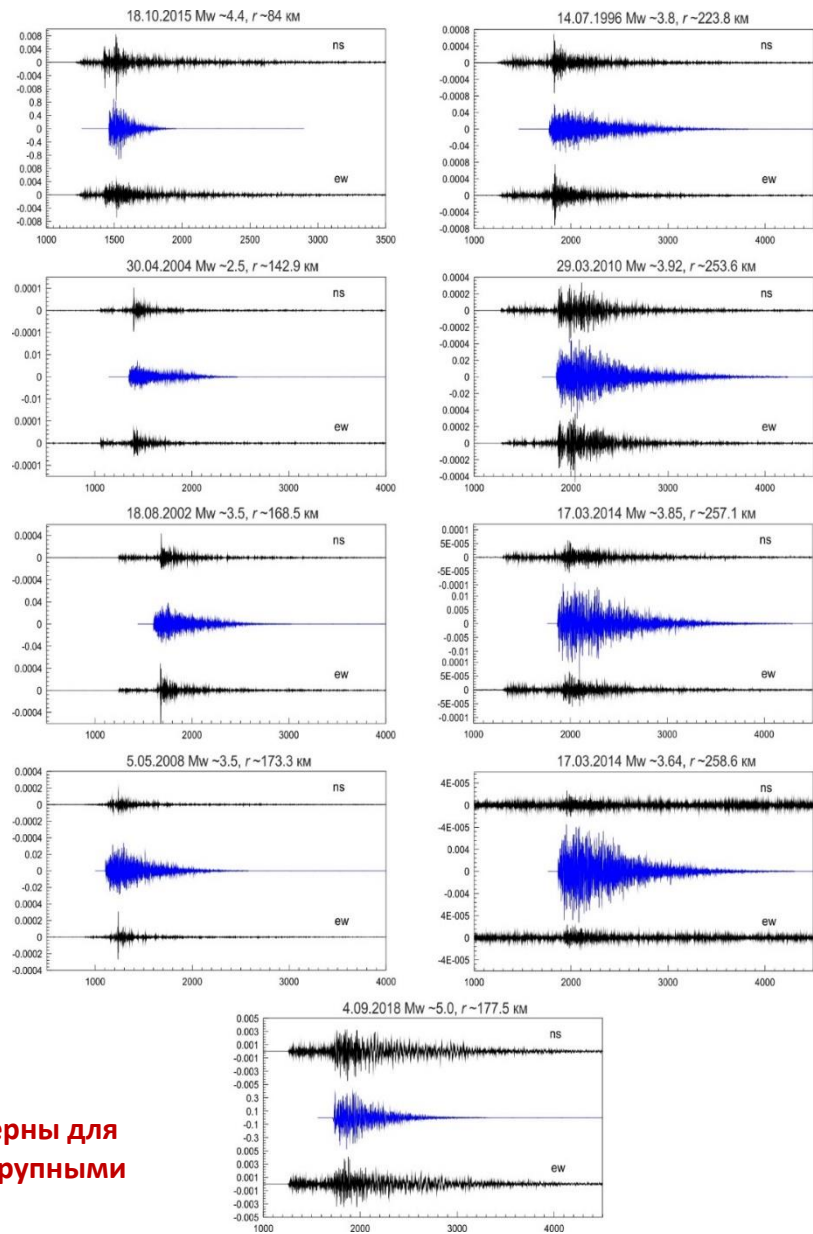
Actions:

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

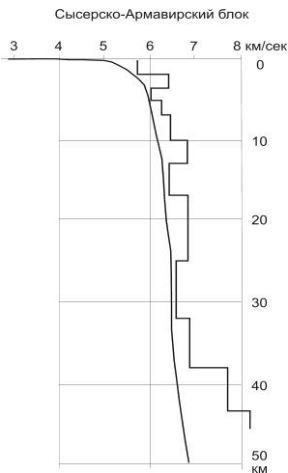
Selected 152 out of 152 stations. Select: All None One station every

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

## 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).

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

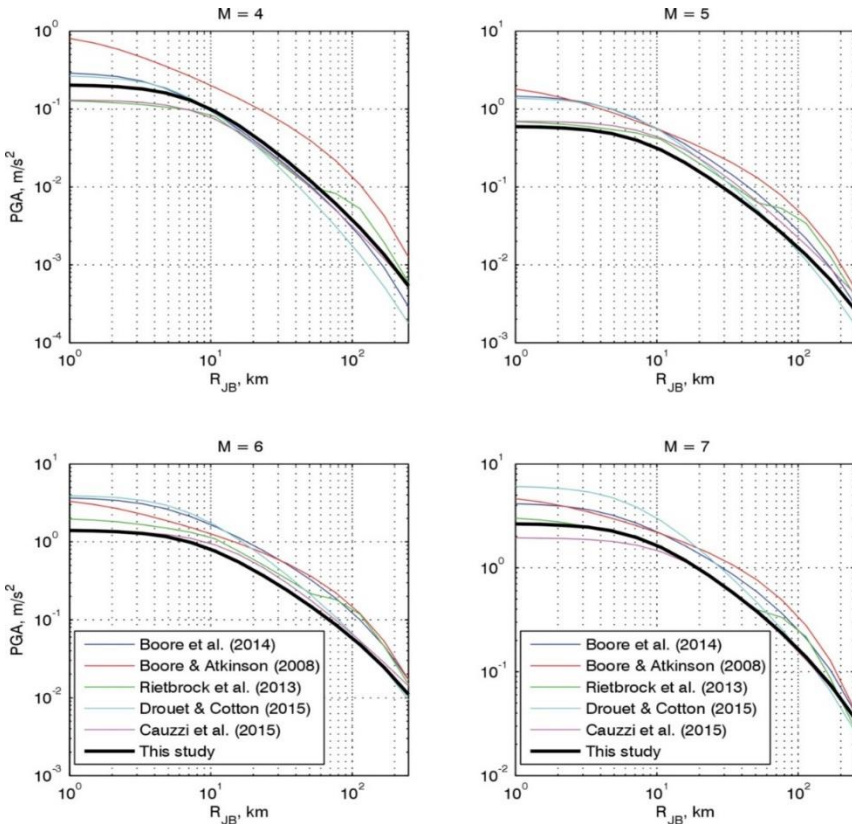
$$F_M(M) = c_1 + c_2(M - M_h) + c_3(M - M_h)^2$$

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

Двухэтапный метод регрессии:

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

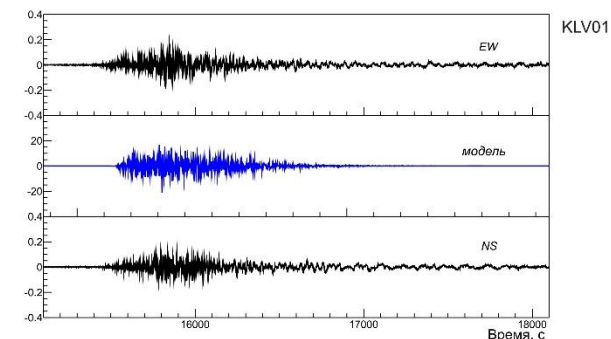
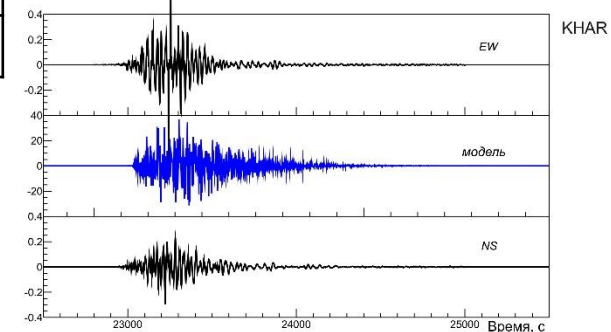
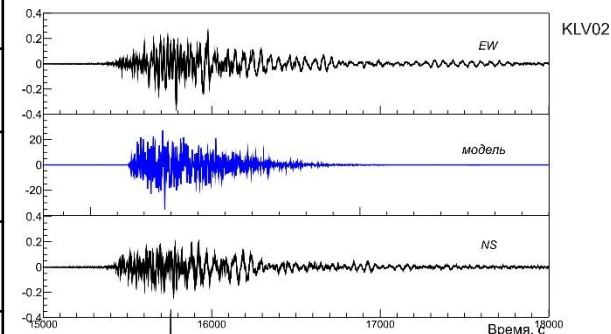
$F_M$  и  $F_D$  описывают эффекты очага и пути распространения,  $M$  – магнитуда,  $R$  – расстояние,  $\varepsilon$  – невязка, отражающая разброс наблюдаемых значений  $\ln(Y)$  относительно оценок модели,  $\sigma$  – стандартное отклонение распределения невязки



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



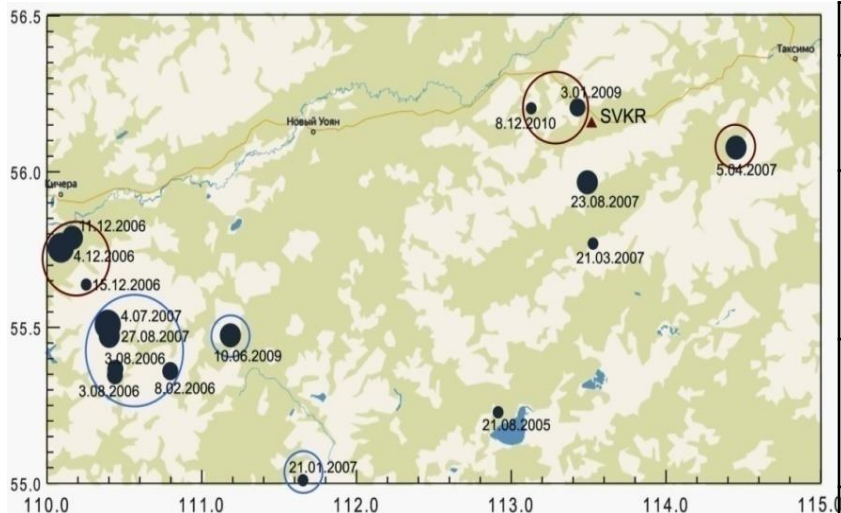
Эпицентр: 54.6311° с.ш., 83.9406° в.д., $h \sim 10$ км
$\Delta\sigma \sim 50$ бар
1/R при $R < 50$ км 1/50 при $50 \leq R < 150$ км
$Q(f) \sim 70 f^{0.9}$ для $r < 50$ км $\sim 30 f^{0.9}$ для $r > 50$ км
$dur(r) \sim 0.3$ для $0 \text{ км} < r < 1 \text{ км}$ $\sim 0.05r$ для $1 \text{ км} < r < 30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



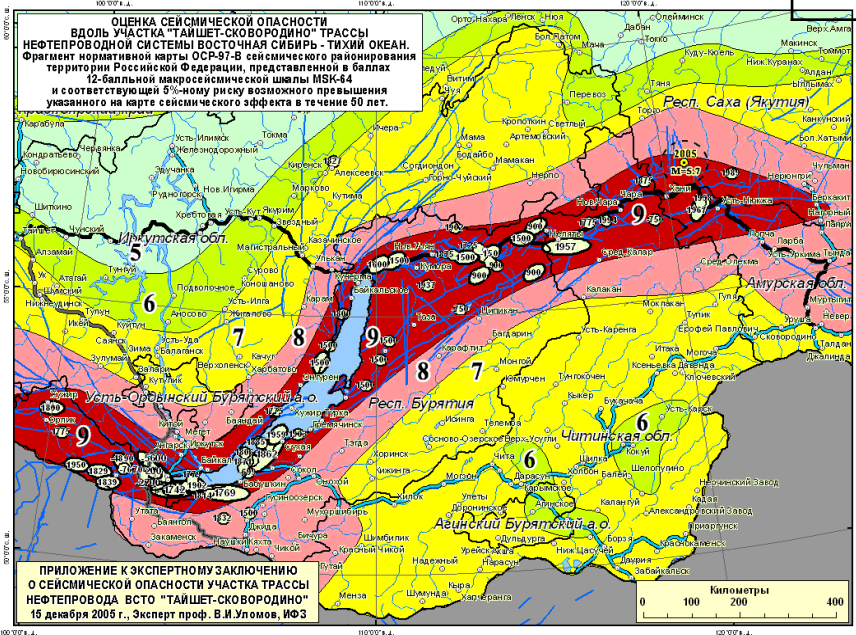
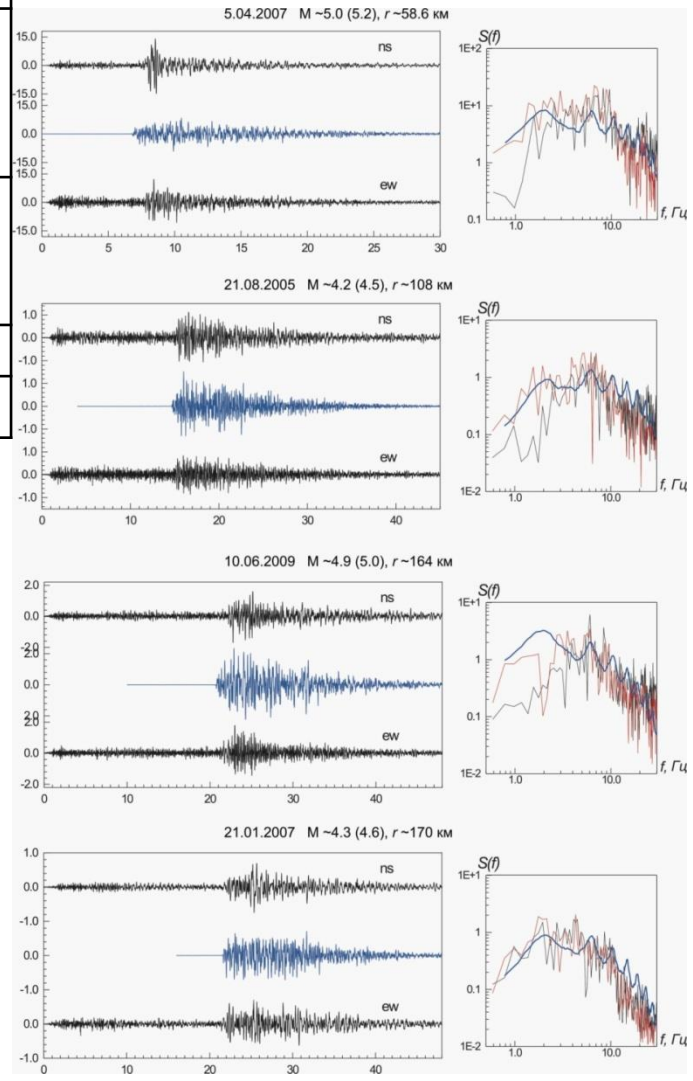
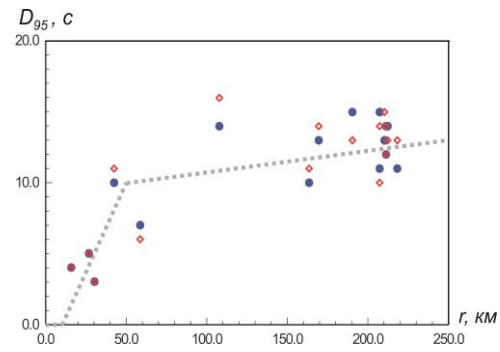
## Землетрясение 27 ноября 2023 г.

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

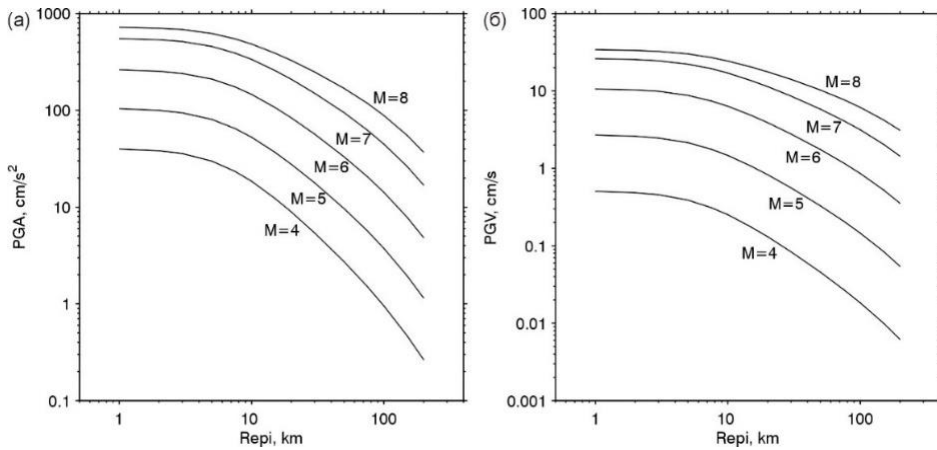
# Изучение особенностей излучения и распространения сейсмических волн в Байкальской рифтовой зоне, стохастическое моделирование и разработка уравнений прогноза движений грунта



$\Delta\sigma \sim 100$ 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**



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

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

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

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

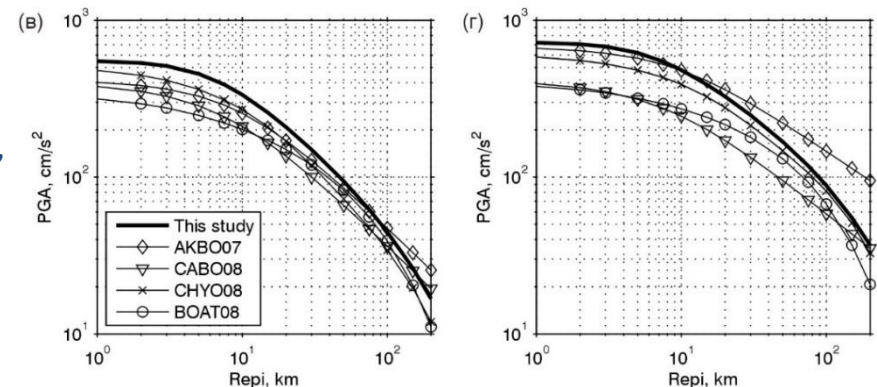
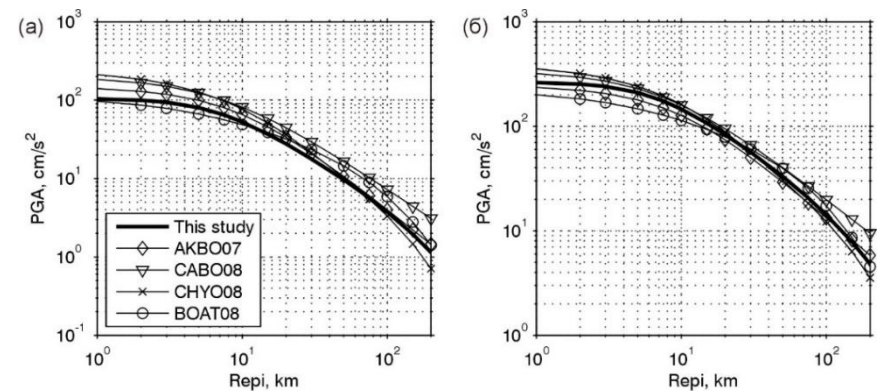
Для **Байкальской Рифтовой Зоны** GEM рекомендует пять уравнений:

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

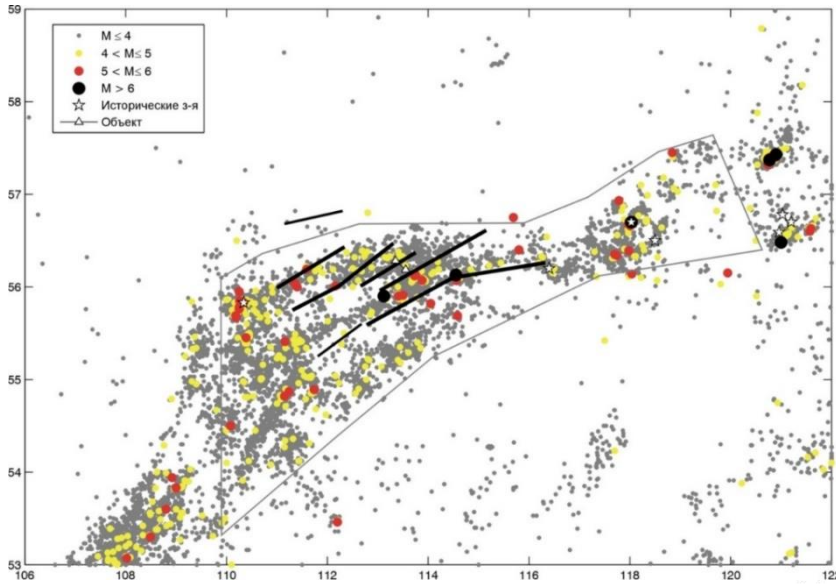
разработанные в проекте Next Generation Attenuation [Boore, Atkinson, 2008; Campbell, Bozorgnia, 2008; Chiou, Youngs, 2008], которые позиционируются как

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:

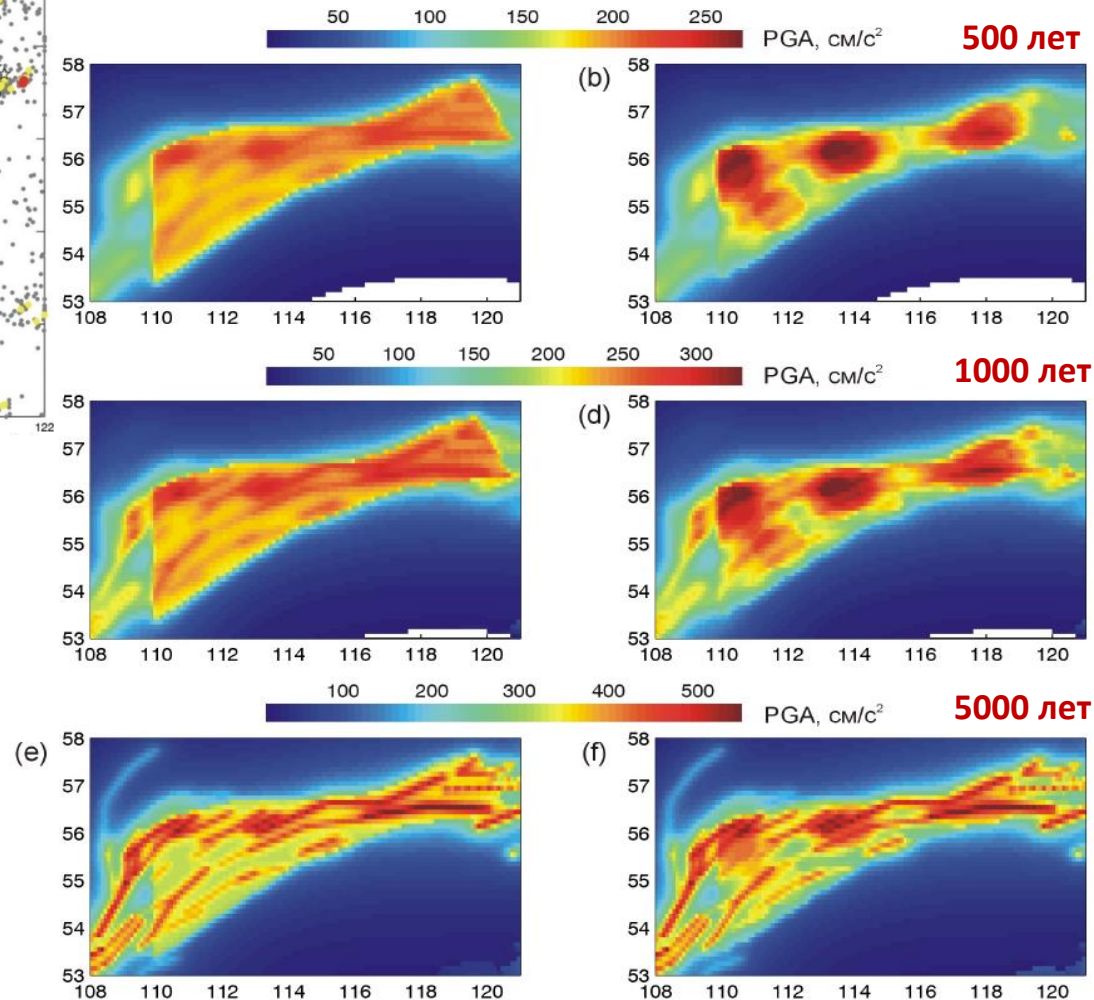
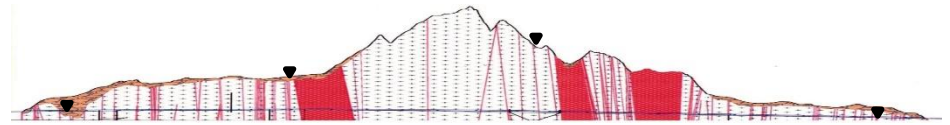
$$\hat{b} = \frac{\log_{10}(e)}{\bar{M} - (M_c - \Delta M/2)}$$

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

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

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

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

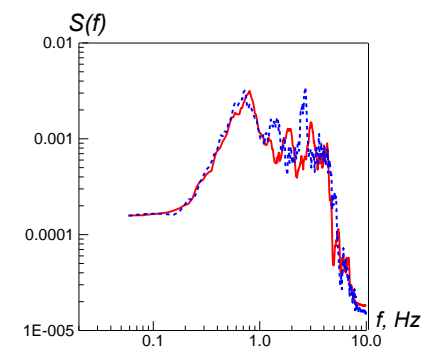
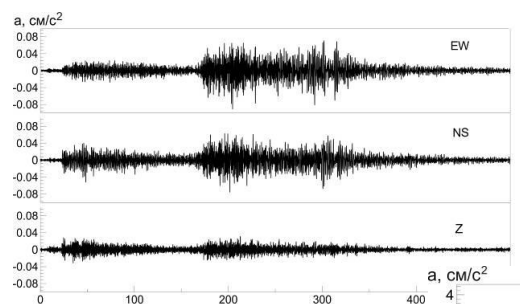
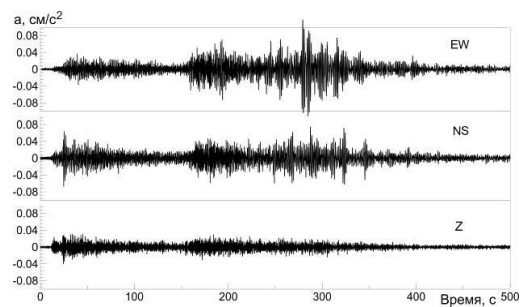
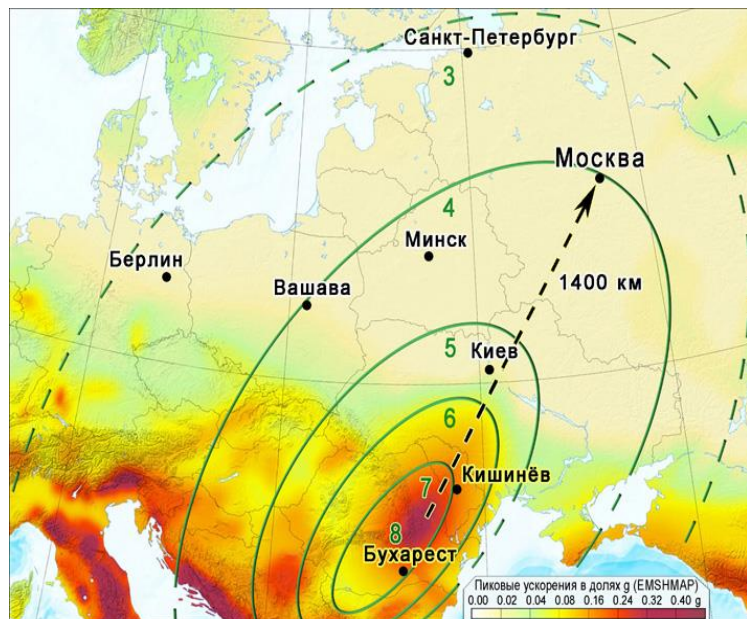


традиционный подход

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)

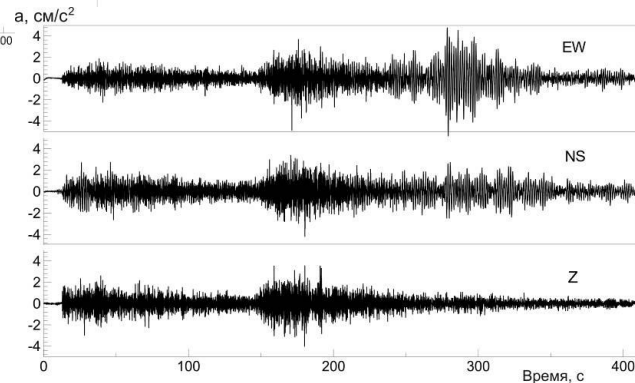


резонансное усиление колебаний на 0,5 – 3 Гц

## 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  $\sim 4,7-7,6 \text{ см/с}^2$ , 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.  $M_w=5.9$