

Современные методы инженерной сейсмологии и оценки параметров сильных движений в Арктике

Ольга Витальевна Павленко

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

Нефтегорское землетрясение 28 мая 1995 г.

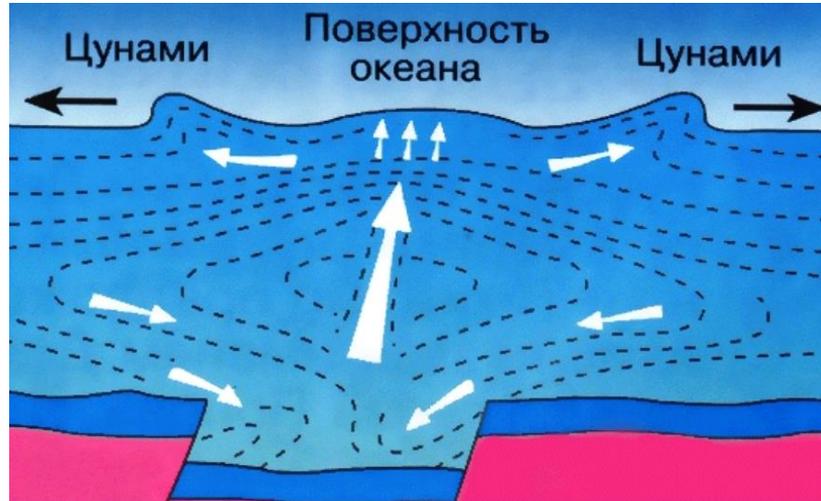
$M_w \sim 7.6$

Спитакское землетрясение 7 декабря 1988

$M_w \sim 7.0$



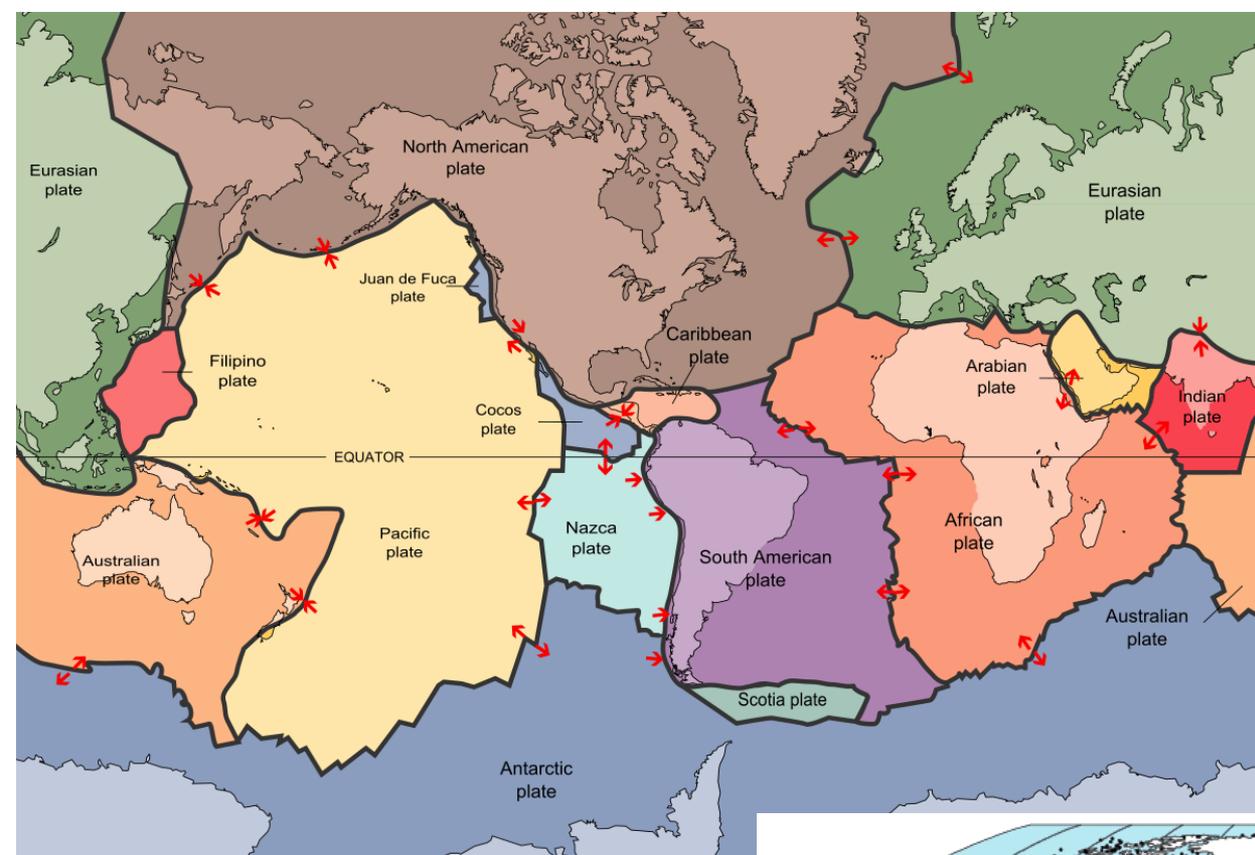
Цунами - возникает при смещении морского дна в результате землетрясения



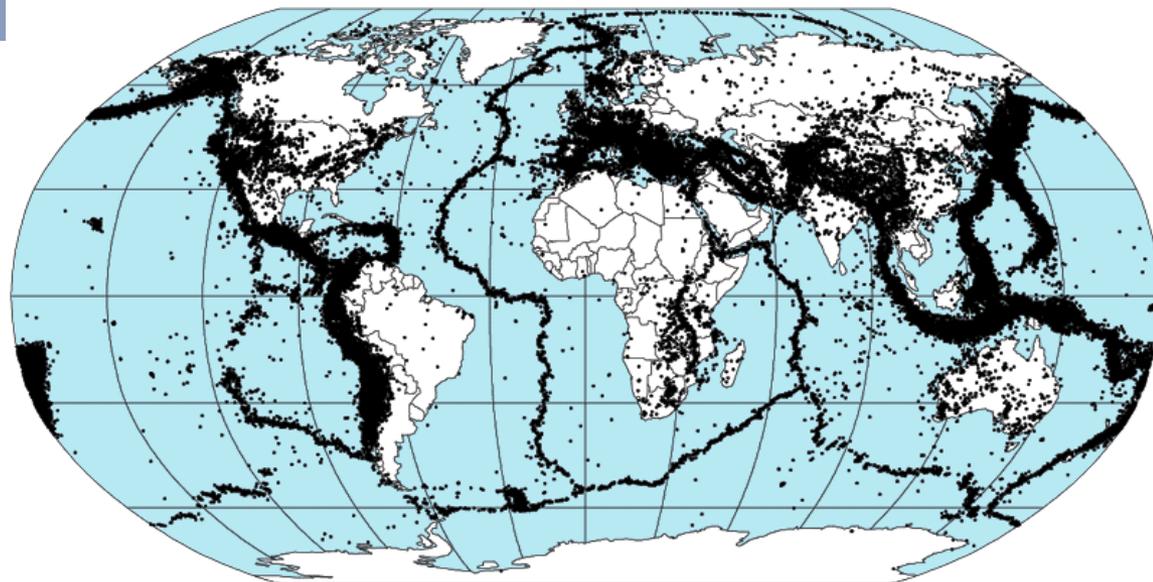
В результате цунами при Суматранском землетрясении 2004 г. погибло 235 000 человек



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



**Литосферные плиты –
крупные стабильные участки
земной коры, части литосферы –
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

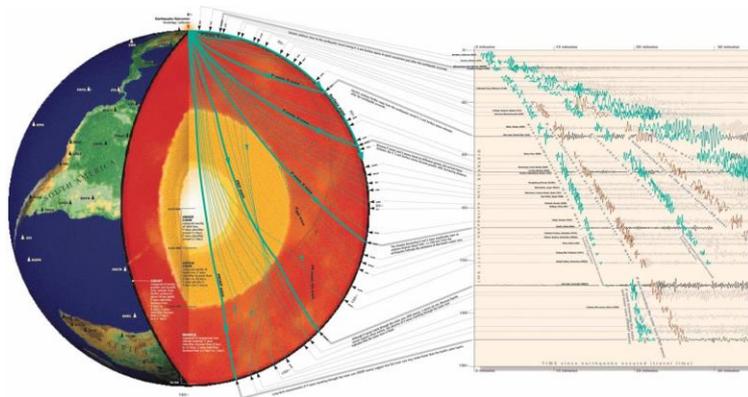
В.И. Кейлис- Борок



А.В. Николаев



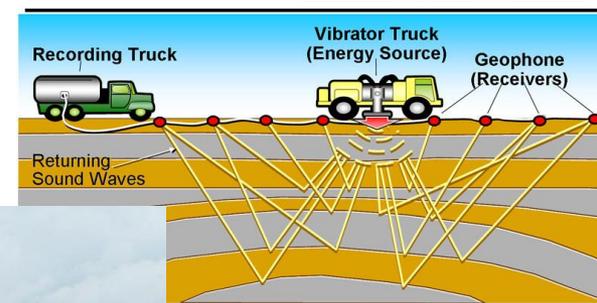
Отдел 100 Сейсмологии

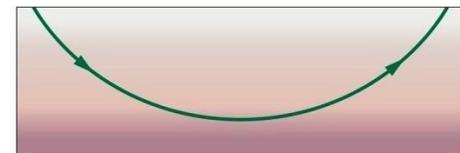
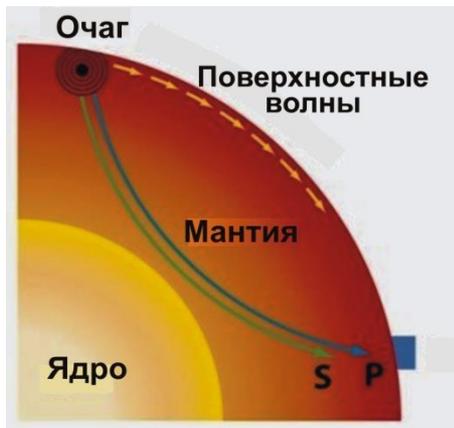


Отдел 800 экспериментальной сейсмологии

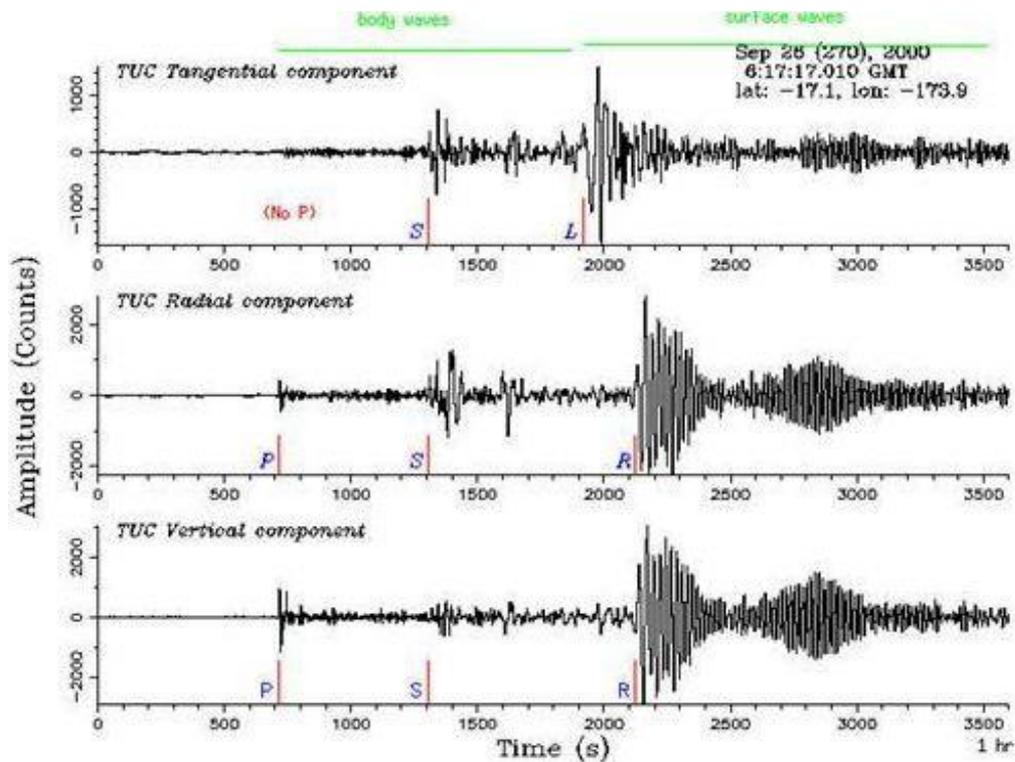
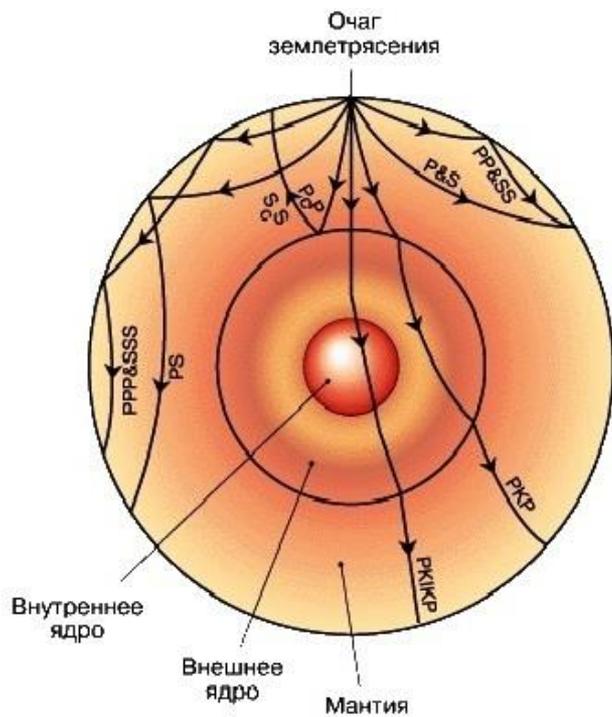
- сейсмика случайно-неоднородных сред;
- геофизический мониторинг;
- нелинейная геофизика; сейсмическая томография;
- вибрационное просвечивание Земли,
- наведенная сейсмичность

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



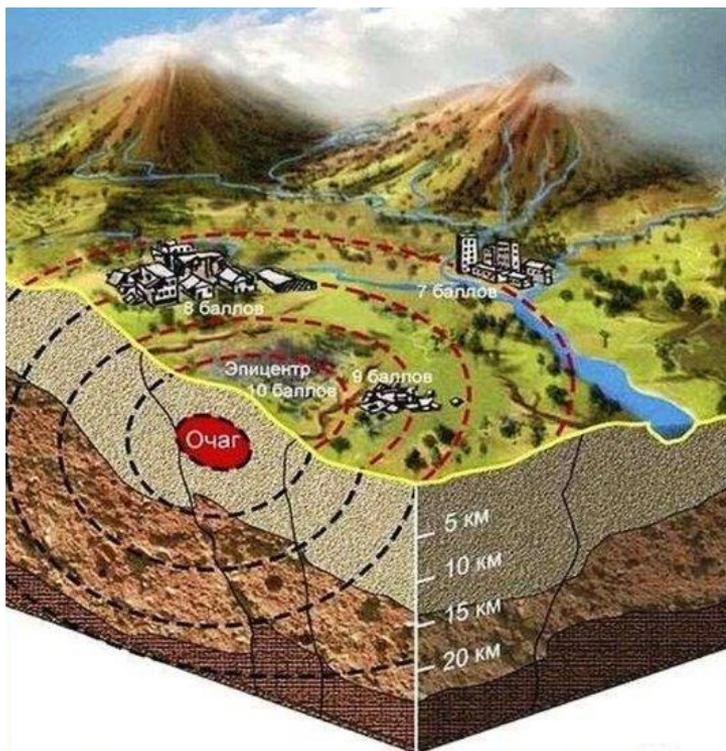


Преломление (рефракция) объемных P- и S- сейсмических волн в слоистых и градиентных средах



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

Приочаговые зоны – акселерограммы. Шумовой характер акселерограмм



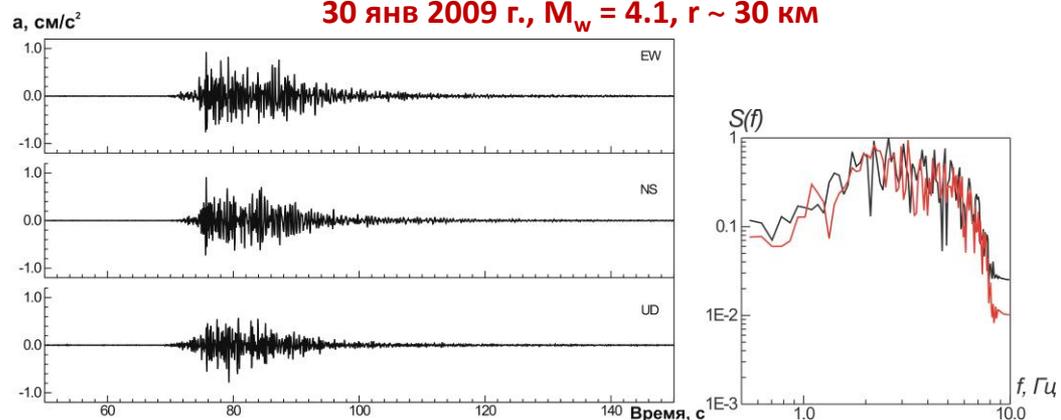
10 баллов – всеобщие разрушения зданий
9 баллов – всеобщие повреждения зданий
8 баллов – сильные повреждения зданий
7 баллов – повреждения зданий

Глубины очагов коровых землетрясений
обычно 5 – 15 км

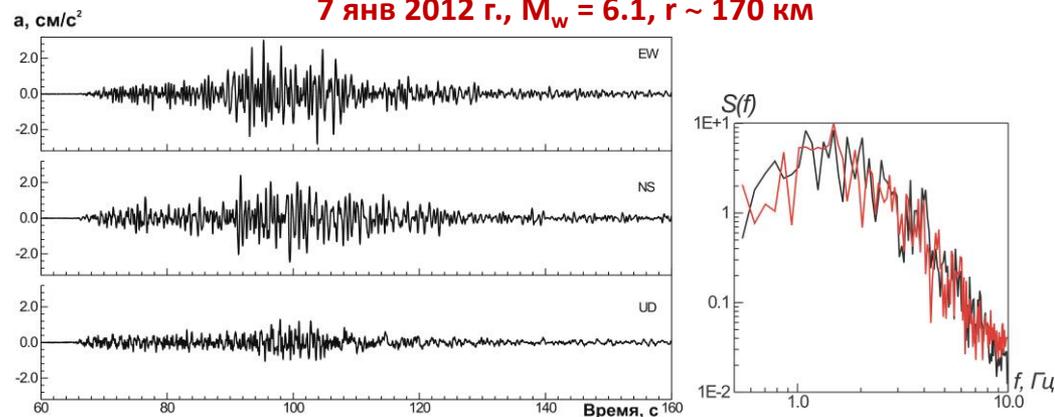
В пределах 100-200 км от очага акселерограммы с хорошей точностью описываются как ограниченный по спектру и по длительности Гауссовский белый шум

**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 с учетом **локальных эффектов (влияния грунта, эффектов топографии и др.)** и оценки движений грунта для инженерного проектирования

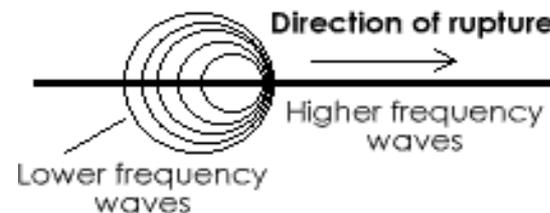


Эффекты очага

азимут, наклон, глубина и размеры разломной плоскости

Магнитуда

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



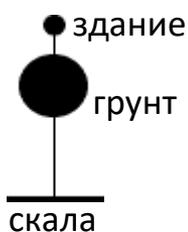
Эффекты пути распространения

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

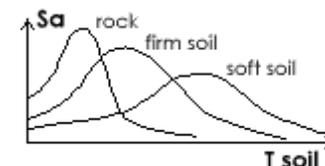
Локальные условия в точке приема

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



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



МОДЕЛИ ОЧАГА:

детерминистские

стохастические

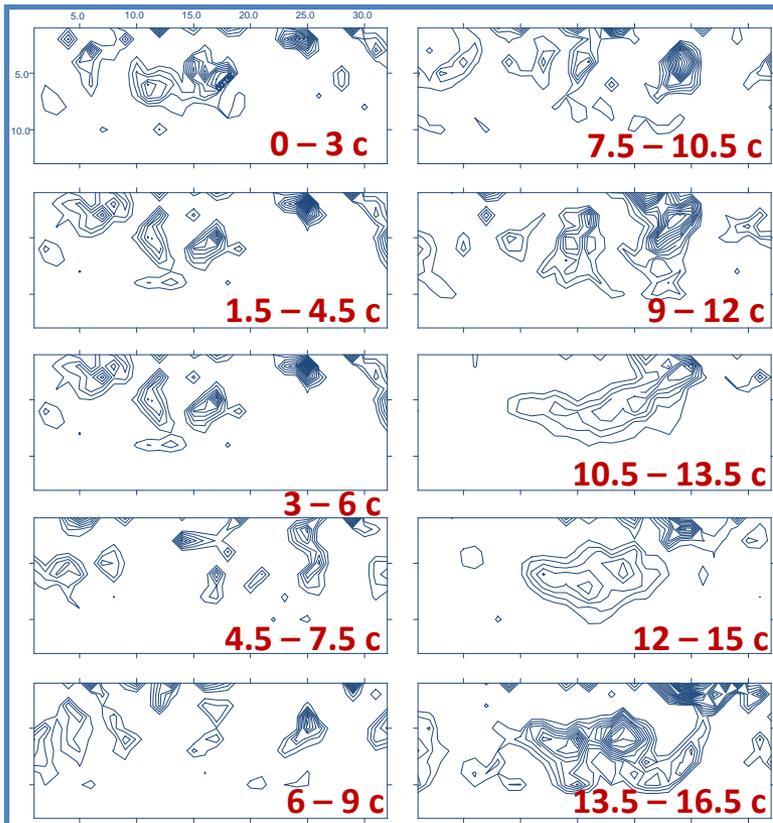
Колебания поверхности при землетрясении - результат пространственно-временной конволюции функции подвижки в очаге с функцией Грина, представляющей отклик земной среды (Аки, Ричардс, 1980)

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 $\Delta\sigma$

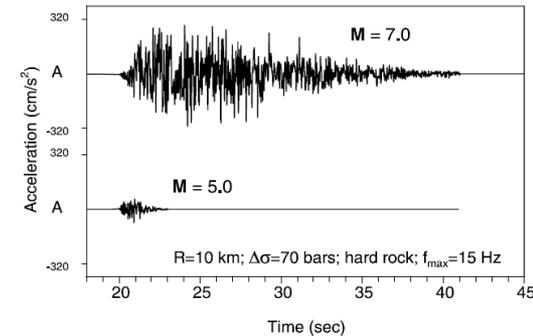
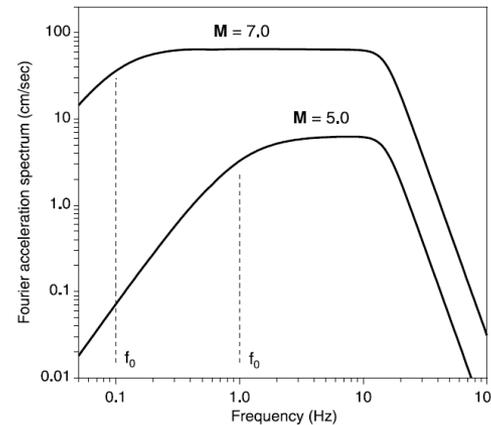
Обратная задача: (Kikuchi, Kanamori, 1982; Ruff, Kanamori, 1983; Archuleta, 1984; Hartzell, Heaton, 1985, 1986; etc.)

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

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



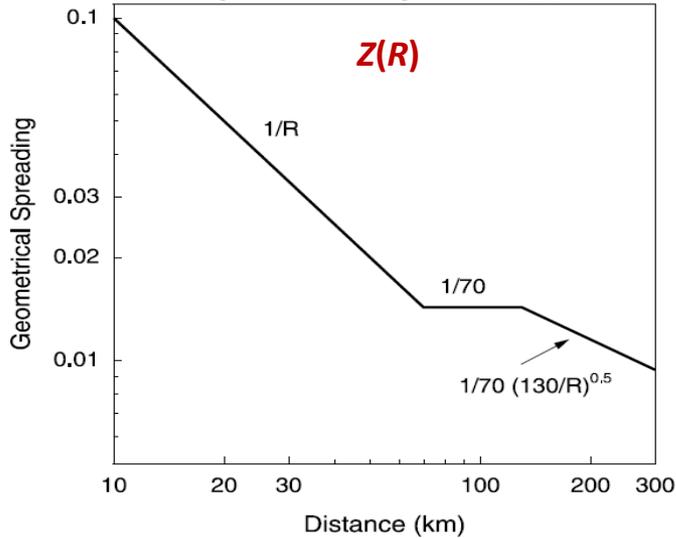
Землетрясение в Чи-Чи (Тайвань) 1999



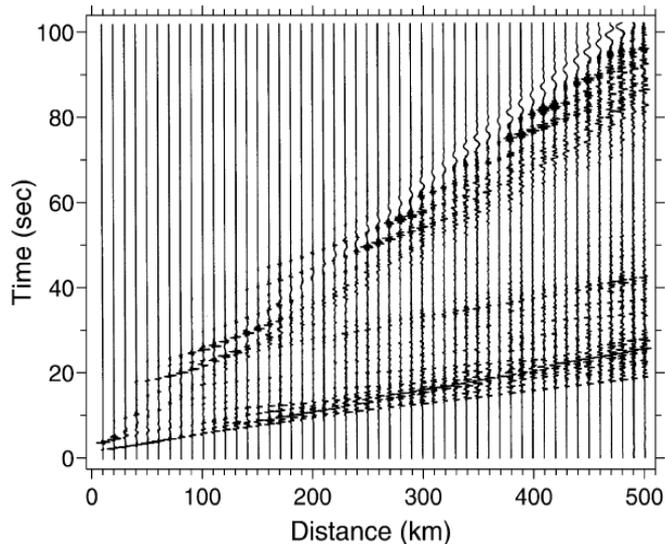
$\Delta\sigma$ зависит от региона, M , типа подвижки, глубины очага,..

Модель ω^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



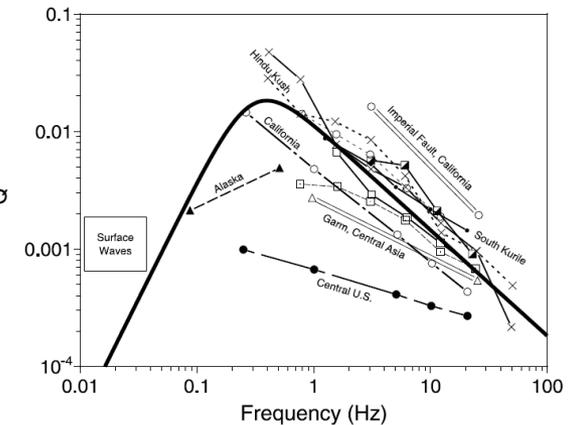
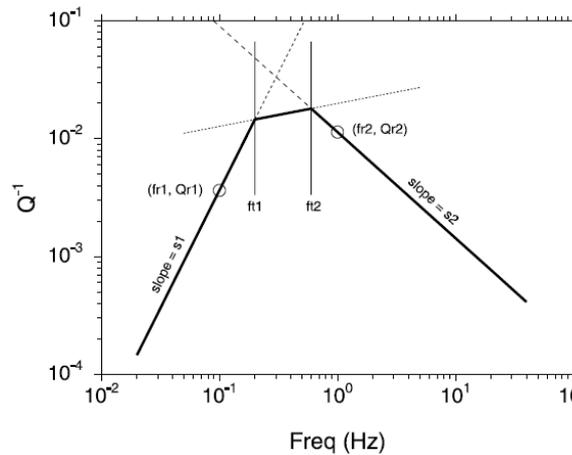
ЭФФЕКТЫ ПУТИ $P(R, f)$

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

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

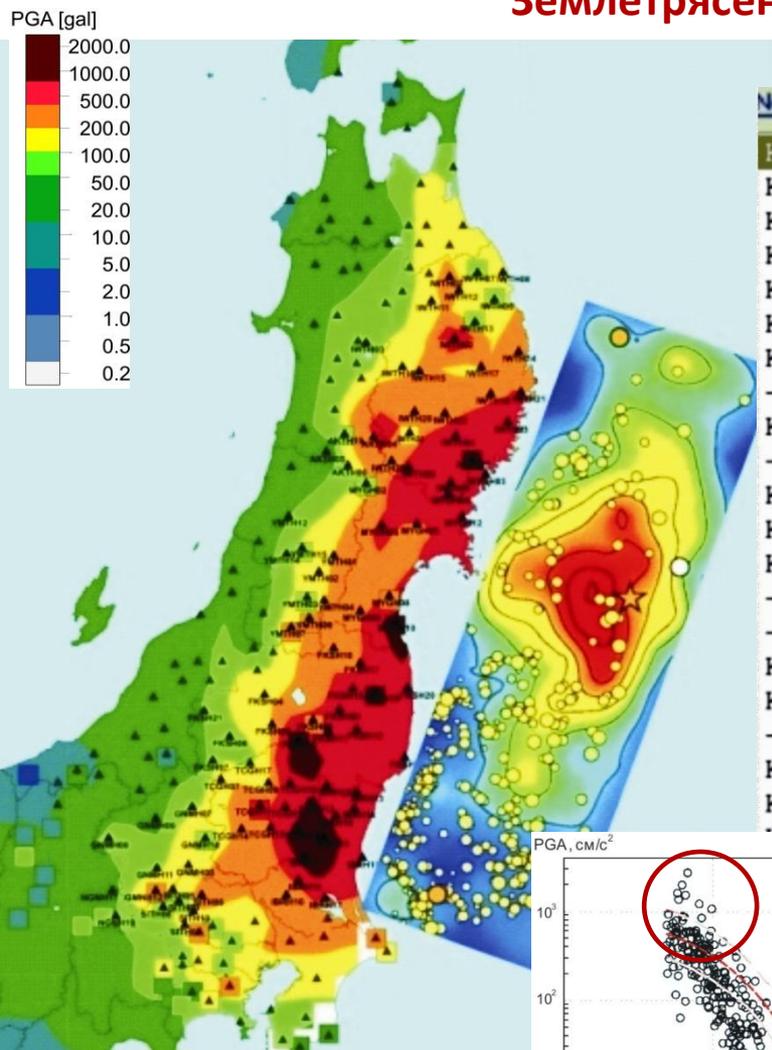
Добротность среды $Q(f)$ (обратная поглощению) может быть оценена по записям слабых землетрясений



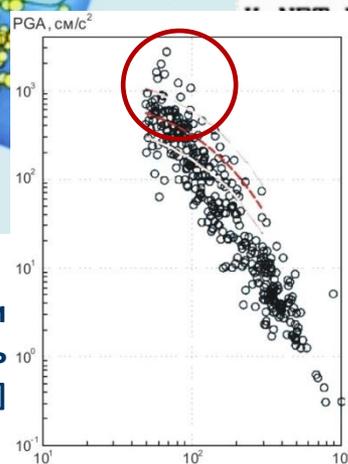
Синтетические сейсмограммы для 4-слойной модели коры в центральных США: реверберация в земной коре (Herrmann, 2000)

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

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



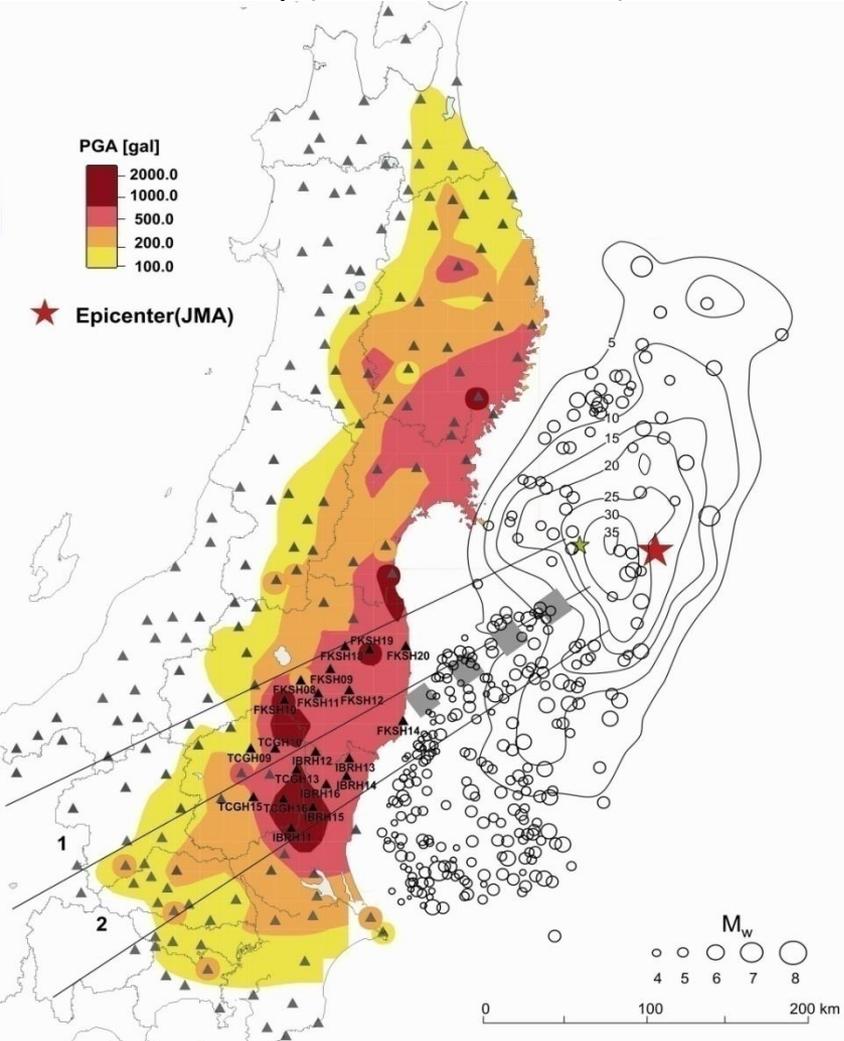
Network	Site code	Recording start time	Latitude	Longitude	Peak acceleration▼	Intensity	Epic
K-NET	MYG004	2011/03/11-14:46:51	38.73N	141.02E	2933.2gal	6.6	0175km
K-NET	MYG012	2011/03/11-14:46:50	38.32N	141.02E	2018.9gal	6.0	0163km
K-NET	IBR003	2011/03/11-14:47:05	36.59N	140.65E	1845.2gal	6.4	0258km
K-NET	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
---	TYG011	2011/03/11-14:46:42	38.31N	141.50E	0939.2gal	5.6	0121km
FKSH19	2011/03/11-14:46:53	37.47N	140.72E	0914.0gal	6.0	0201km	
TCGH13	2011/03/11-14:47:05	36.73N	140.18E	0907.5gal	6.1	0282km	
FKS007	2011/03/11-14:46:55	37.41N	140.96E	0880.6gal	5.7	0184km	



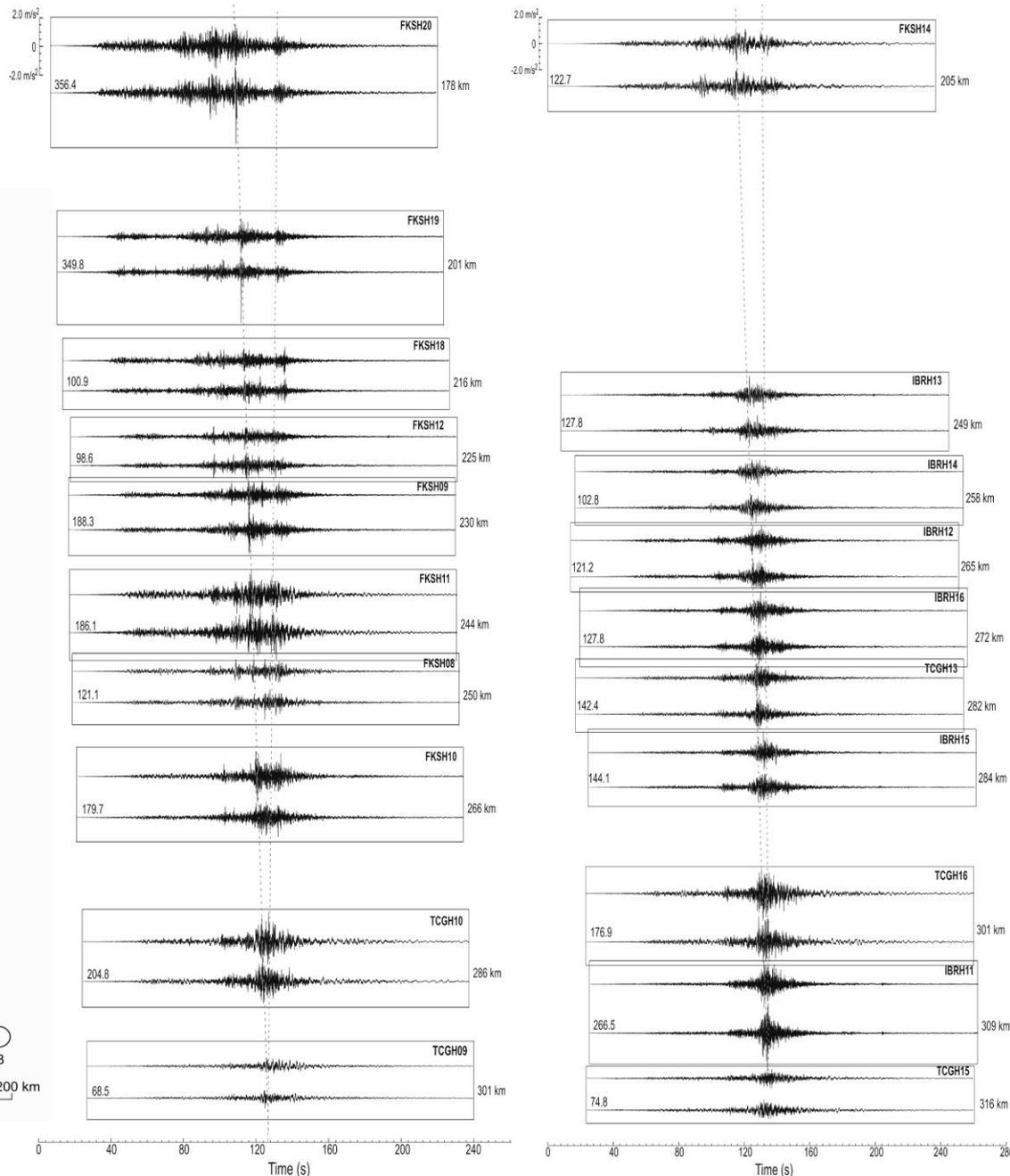
19 станций сильных движений K-NET и KiK-net зарегистрировали ускорения выше 1 g

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 2011 г.

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

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

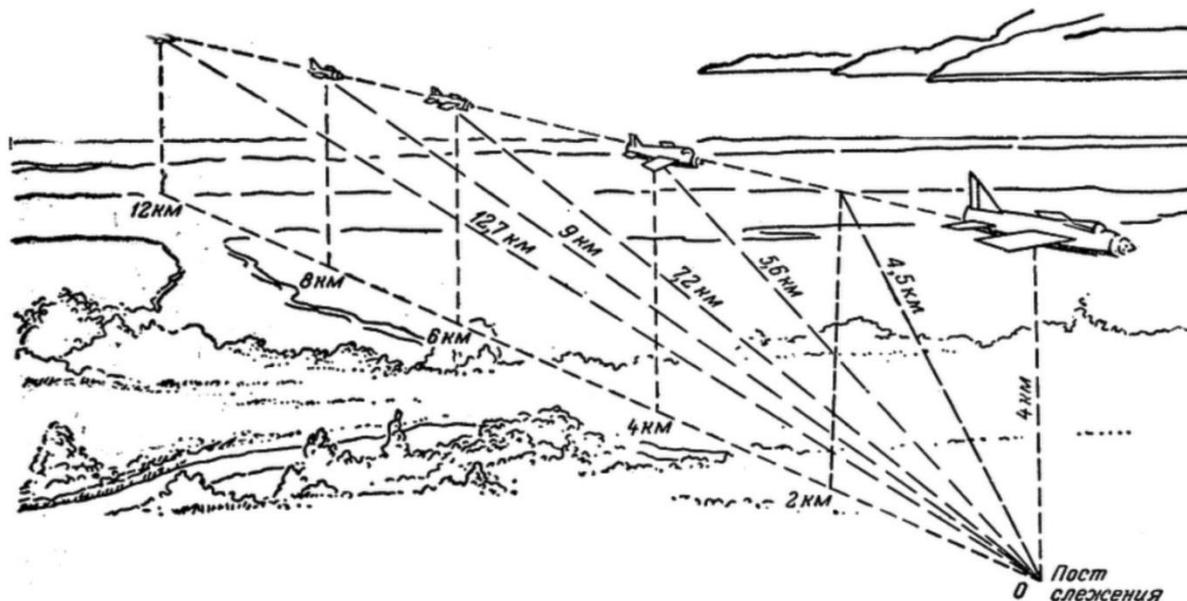


Рис. 7. К обсуждению ударной волны от сверхзвукового самолета

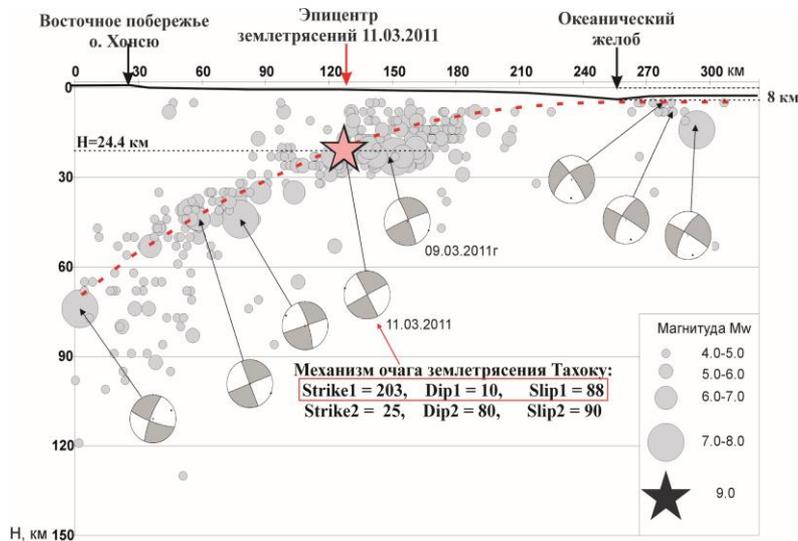
Близкую часть полета слышим
в обычной
последовательности, а
дальнюю часть полета - в
обратном порядке:
первыми приходят волны,
излученные позже

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

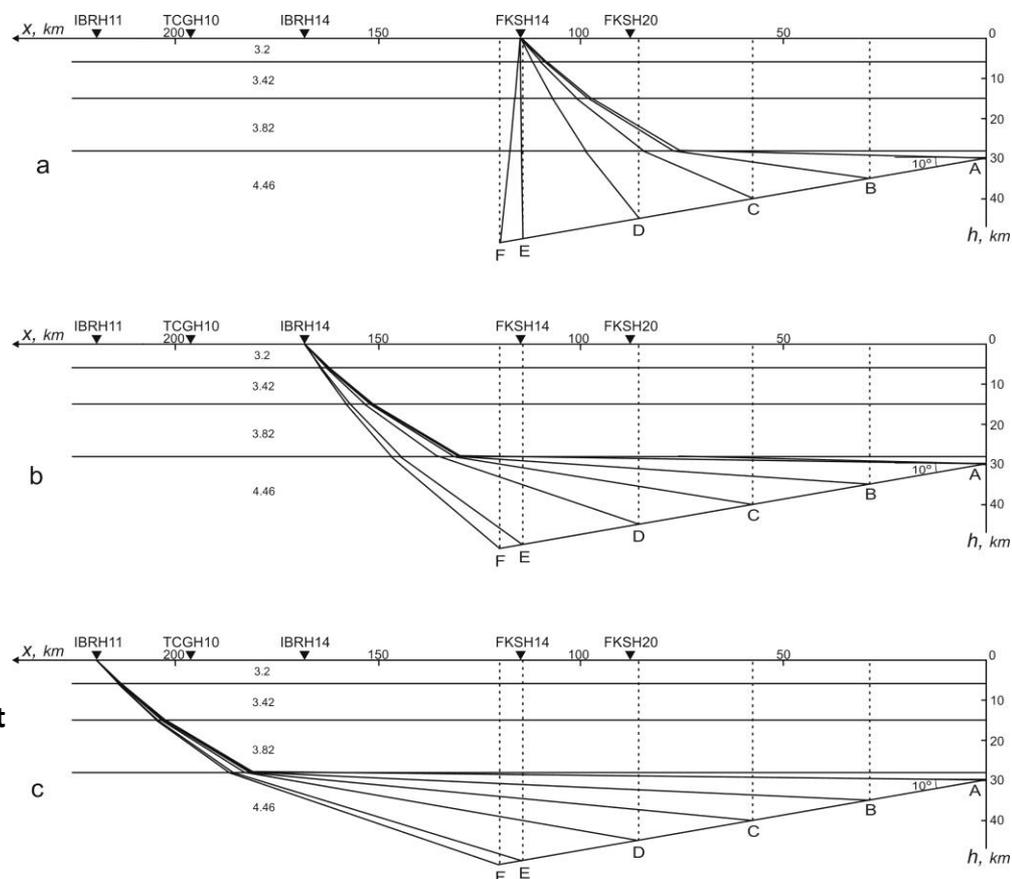
возникает **ударная волна**

Таблица 1

Момент испускания звука, сек	Координата точки, над которой пролетает самолет, км	Расстояние от самолета до наблюдателя по прямой, км	Время пробега звuka, сек	Момент прихода звuka 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



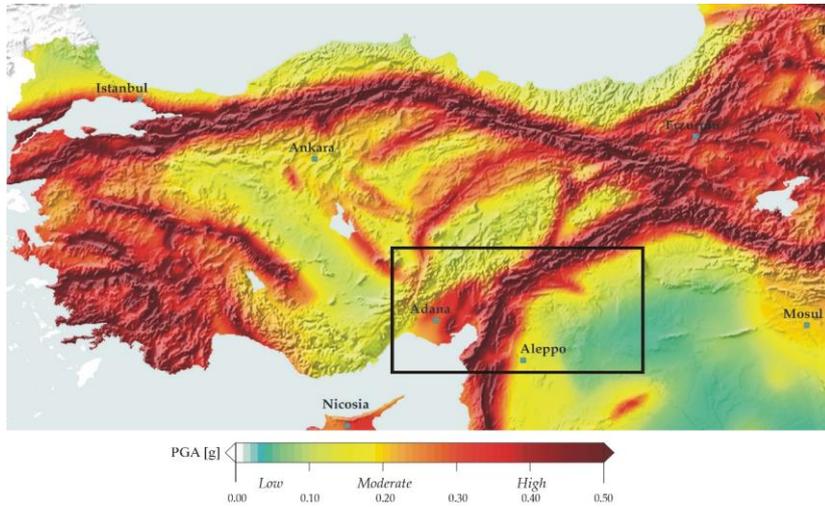
Продолжительность сильных движений на станциях KiK-net при распространении со скоростью V трещины на участке разломной плоскости длиной l при землетрясении Тохоку ($l \sim 120$ км, $\alpha \sim 10^\circ$, $V \sim 4$ км/с)



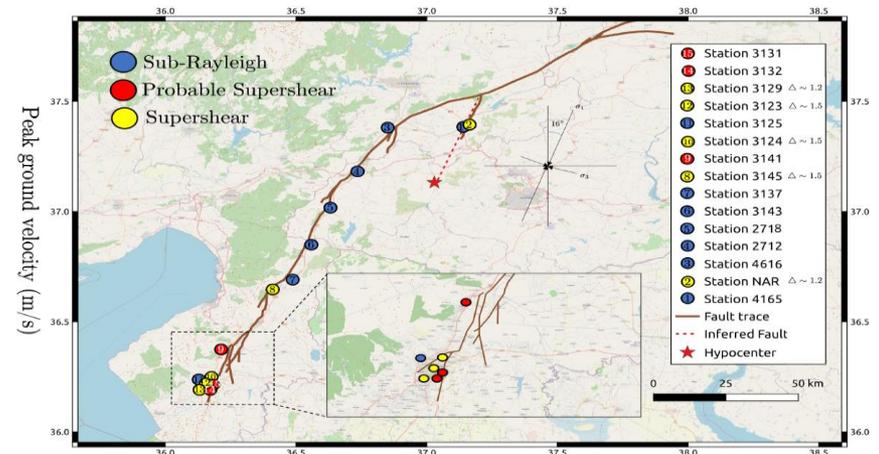
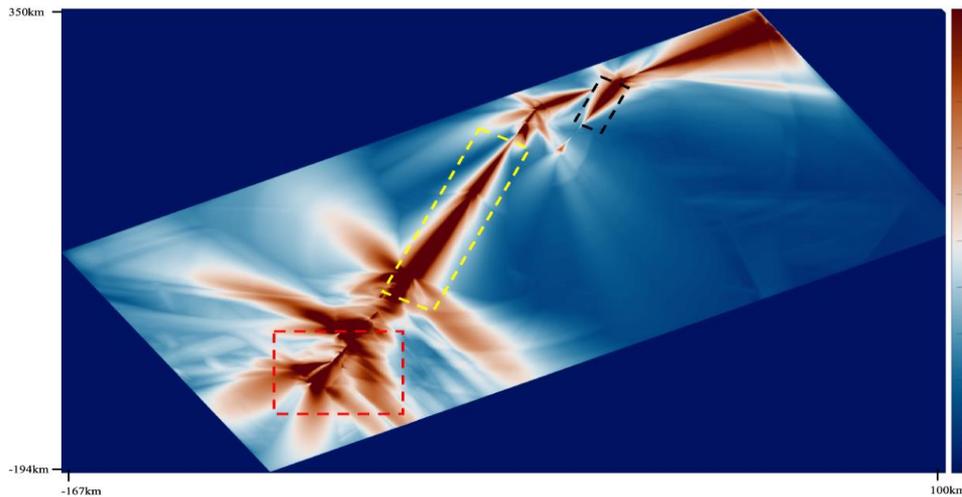
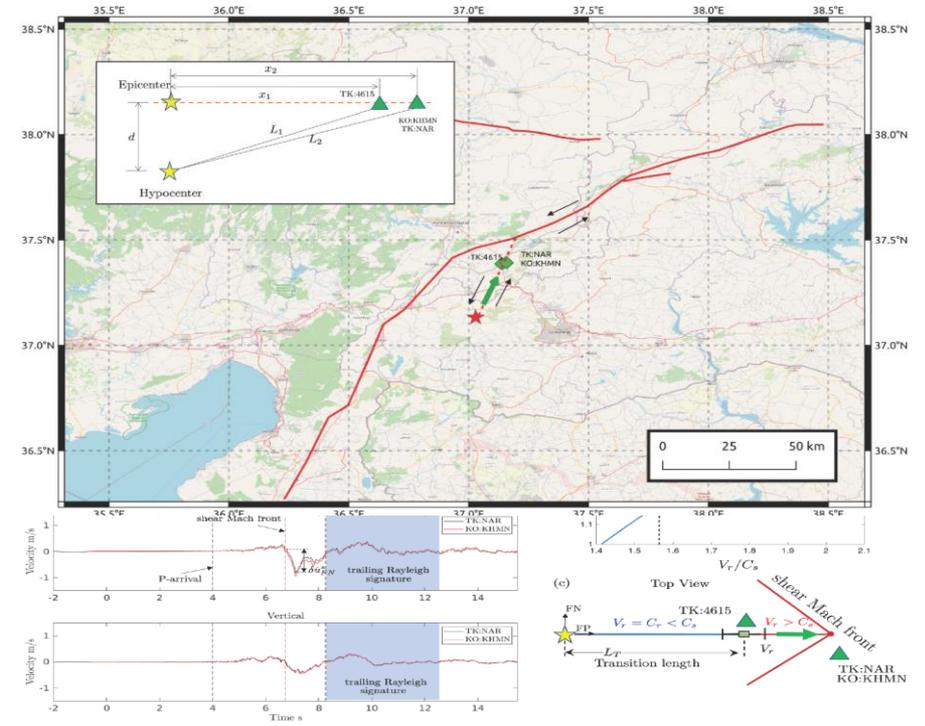
Момент излучения S-волн концом трещины (с)	Координата проекции конца бегущей трещины на ось X (км)			Глубина конца трещины h (км)	Время пробега S-волн от конца трещины к станциям KiK-net(с)			Время прихода S-волн к станциям сети KiK-net(с)		
	FKSH14	IBRH14	IBRH11		FKSH14	IBRH14	IBRH11	FKSH14	IBRH14	IBRH11
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**

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

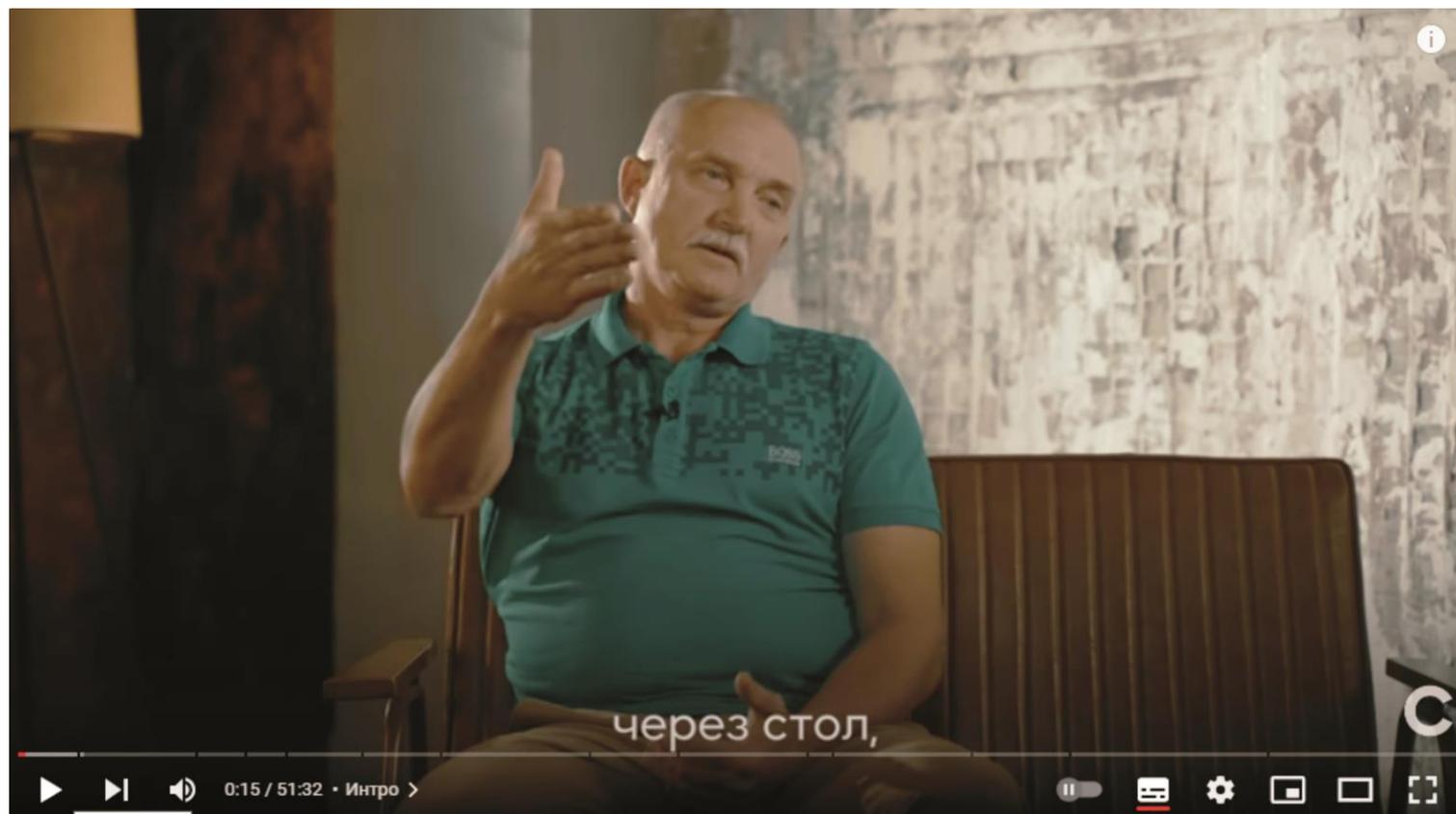


Распределение пиковых скоростей (PGV), полученное в результате численного моделирования динамического разрыва (из работы [Abdelmeguid et al., 2023]).



«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 1995 г.)

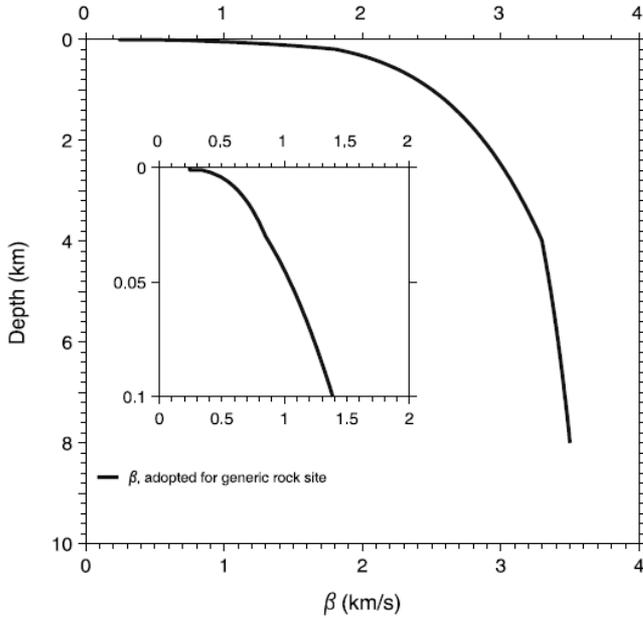


ЛОКАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ И ОСЛАБЛЕНИЕ ВОЛН В ЗЕМНОЙ КОРЕ $G(f)$ (без учета влияния грунта)

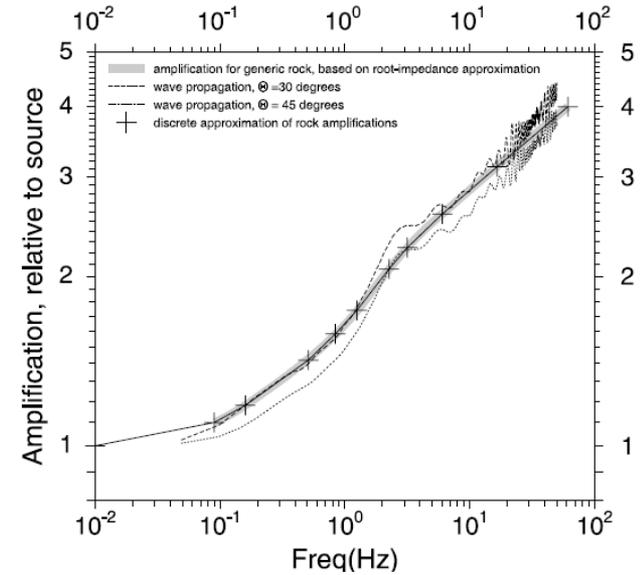
$$G(f) = A(f) D(f)$$

Усиление в коре

ослабление (независимое от эффектов пути)



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

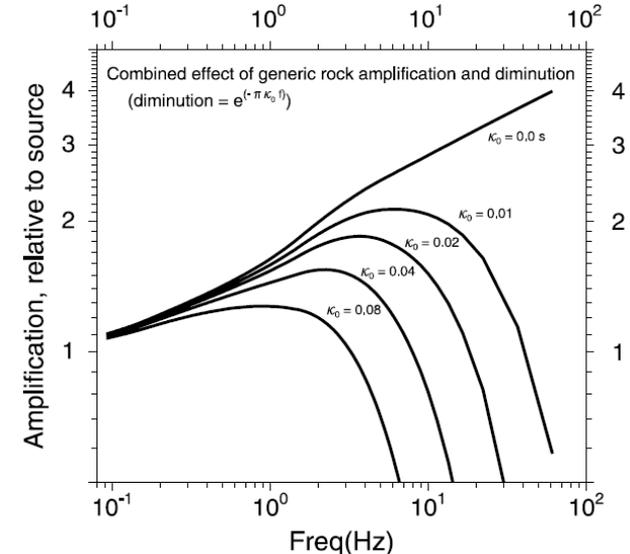


$D(f)$ – ослабление высокочастотных компонент; по мнению разных авторов, очаговый либо локальный эффект, либо их комбинация

описывается выражением:

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

Комбинированный эффект локального усиления и независимого от пути ослабления



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

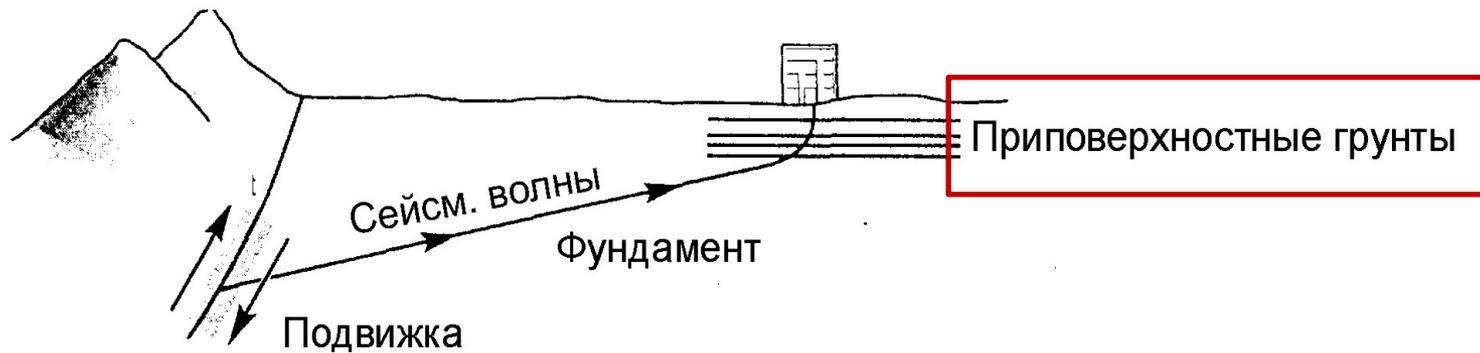


Землетрясение в Анкоридже 27 марта 1964, $M = 9.1$ **Землетрясение в Ниигате 16 июня 1964 $M = 7.5$**



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

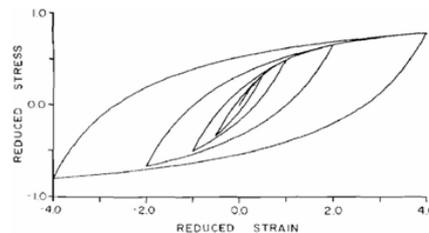
В речных долинах в сейсмоопасных районах расположены такие большие города мира как Токио, Осака, Кобе, Лос-Анжелес, Сан-Франциско, Сан-Сальвадор, Каракас, Лима, Богота, Катманду, Манила, Салоники, Мехико и другие



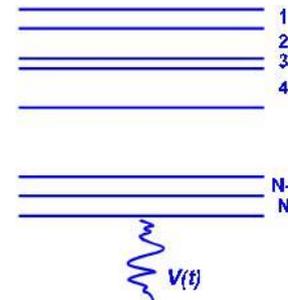
Методы расчета отклика грунта (1970-80-е годы):

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 NONLI3 (Joyner and Chen, 1975)

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

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

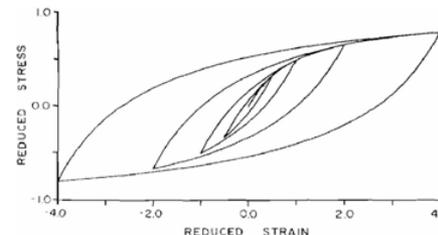
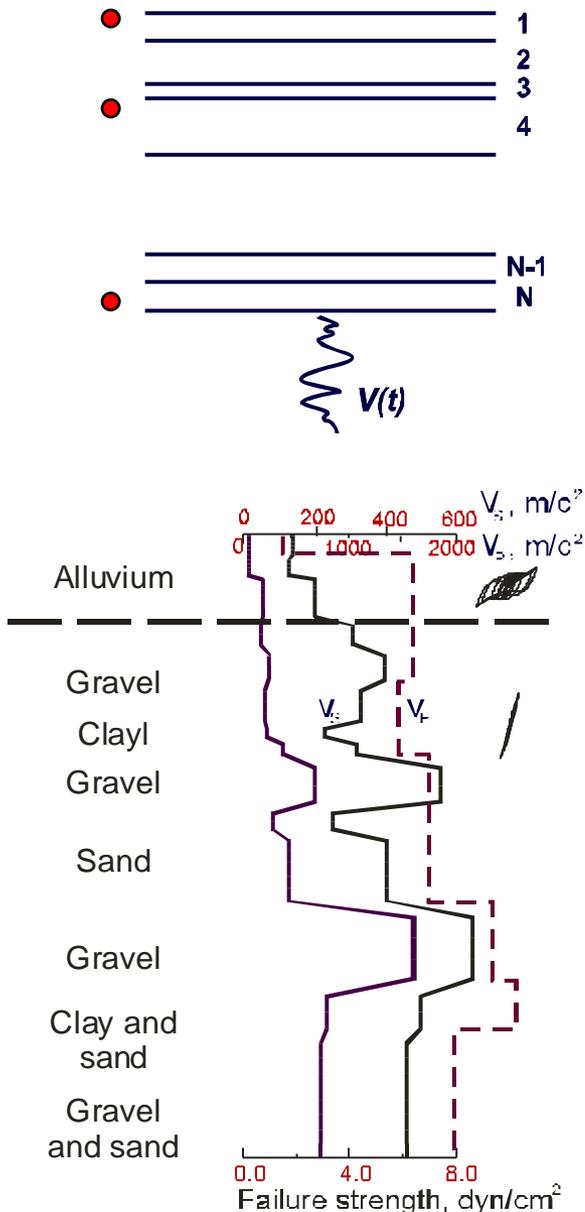
где Δx_i - мощность слоя,

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

3. По Δe_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 $(t+\Delta t)$:

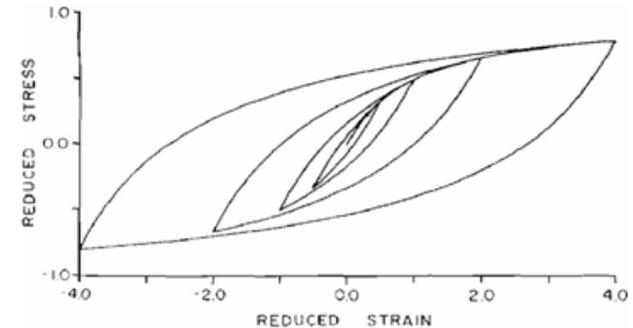
$$V_{i+1}(t+\Delta t) = V_{i+1}(t) + [(\tau_{max})_{i+1} s_{i+1} - (\tau_{max})_i \sigma_i] \Delta t / m_{i+1},$$

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

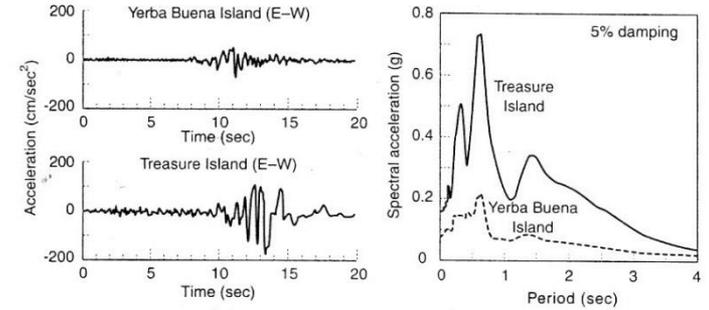
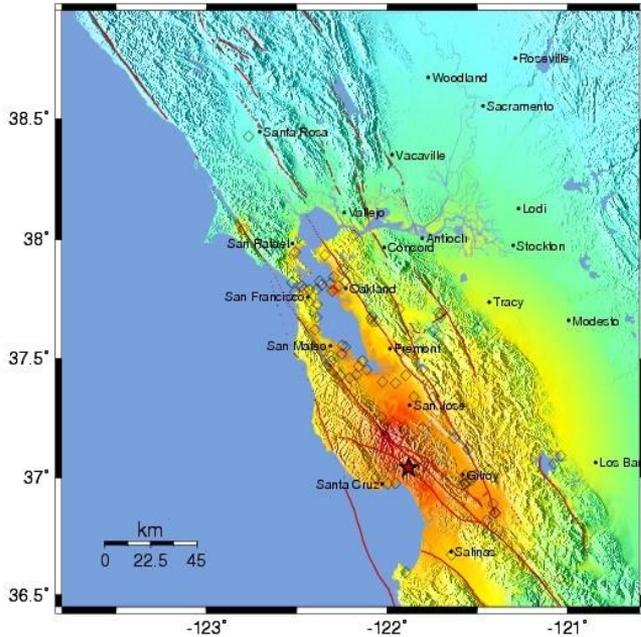
Механизмы преобразований сейсмических волн в грунтовых слоях:

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

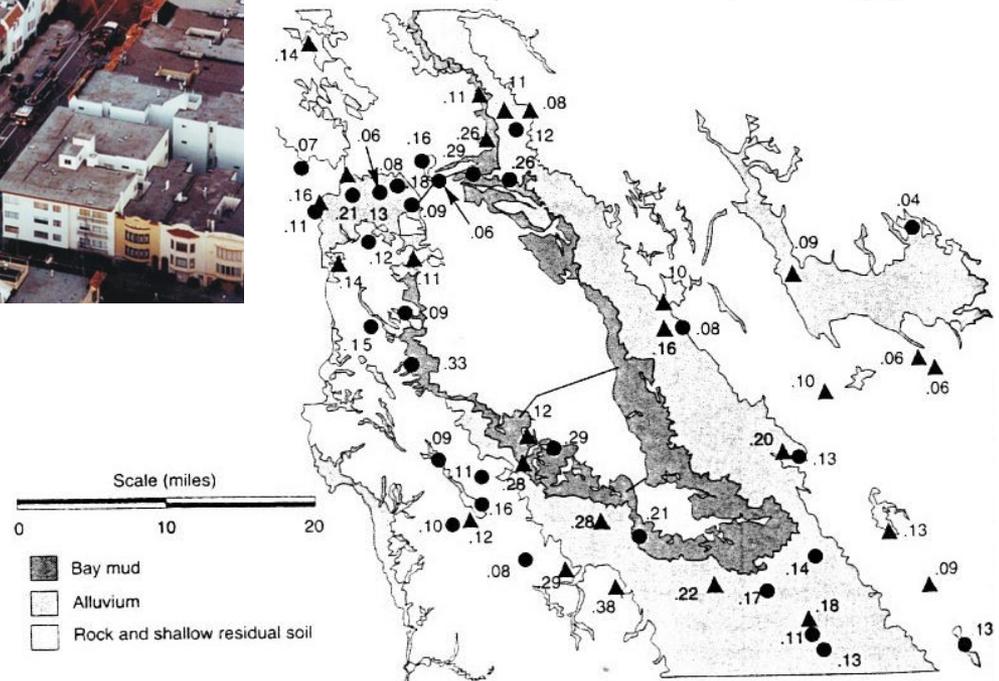
1. Усиление сейсмических волн в грунтовых слоях

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

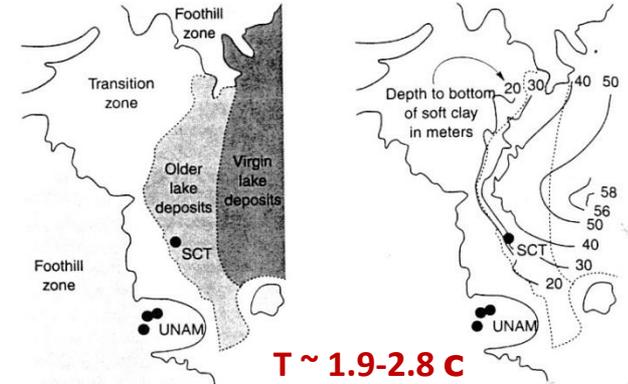
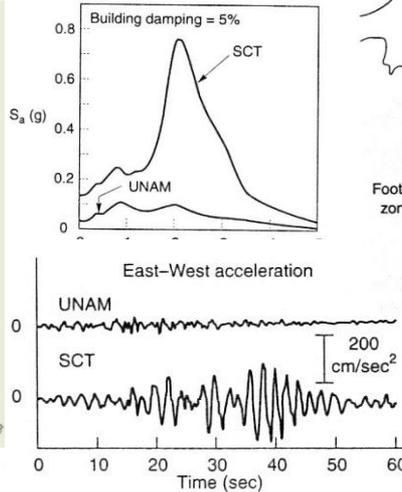
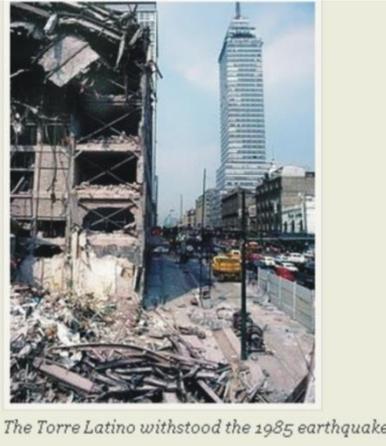
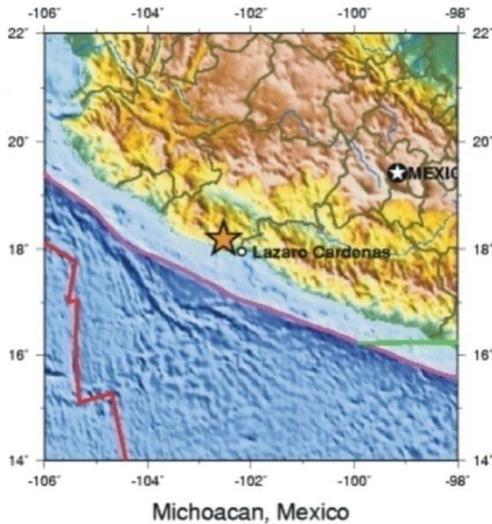


PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC (%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	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)



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

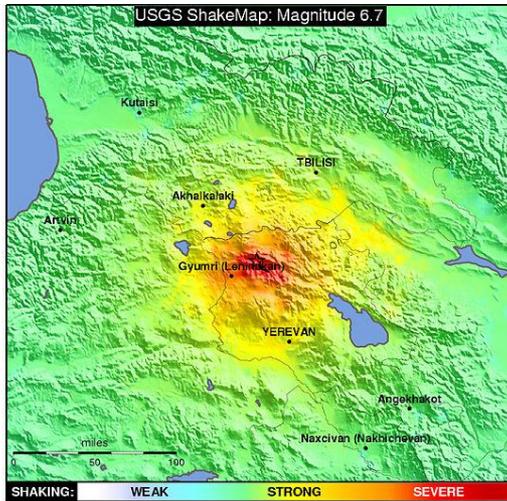
Разрушены или сильно повреждены здания в 5-20 этажей на озерных отложениях (в центре города) $T \sim N/10 \text{ c}$

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

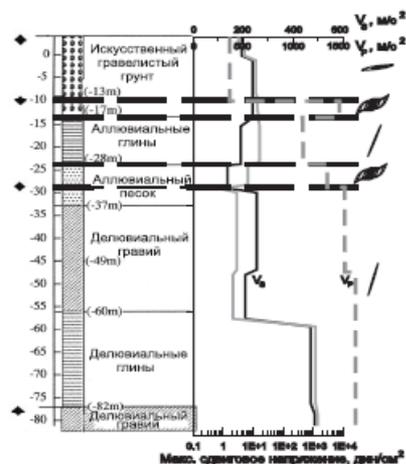
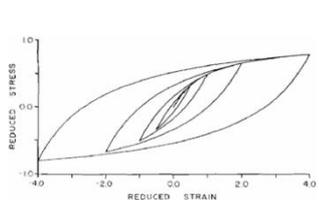
Погибло более 25 000 человек

В Ленинакане разрушены здания, периоды собственных колебаний которых $\sim 0,3 - 0,9 \text{ c}$ совпали с периодами собственных колебаний подстилающих грунтов - суглинков с туфами и супесями

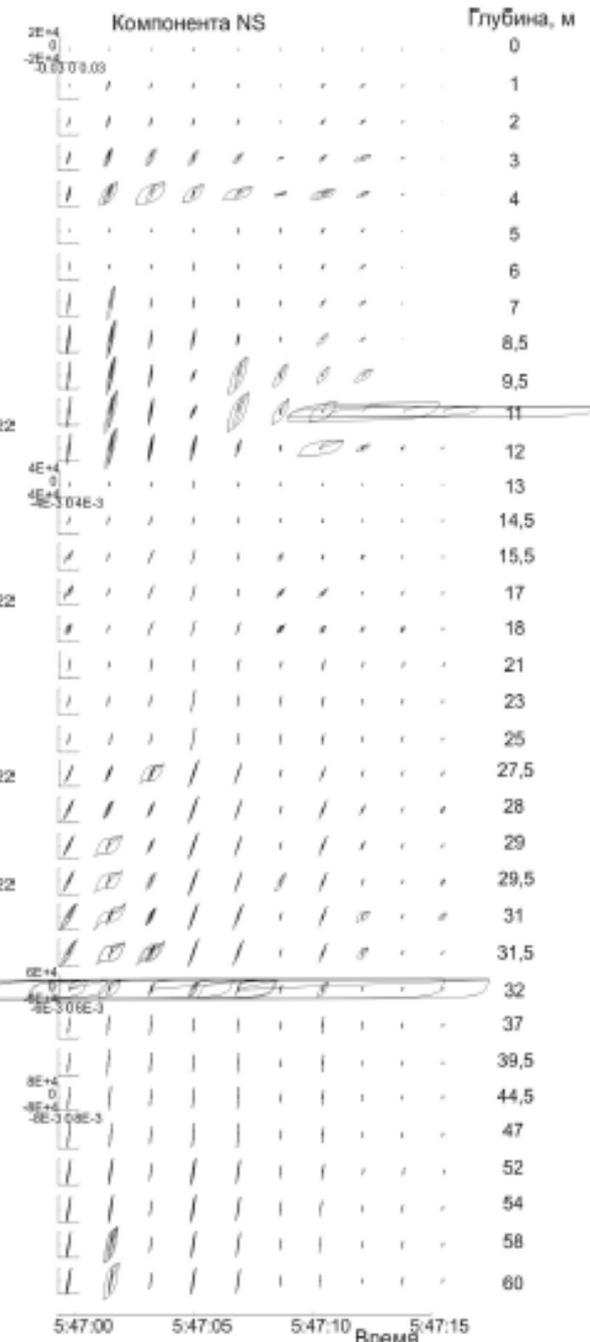
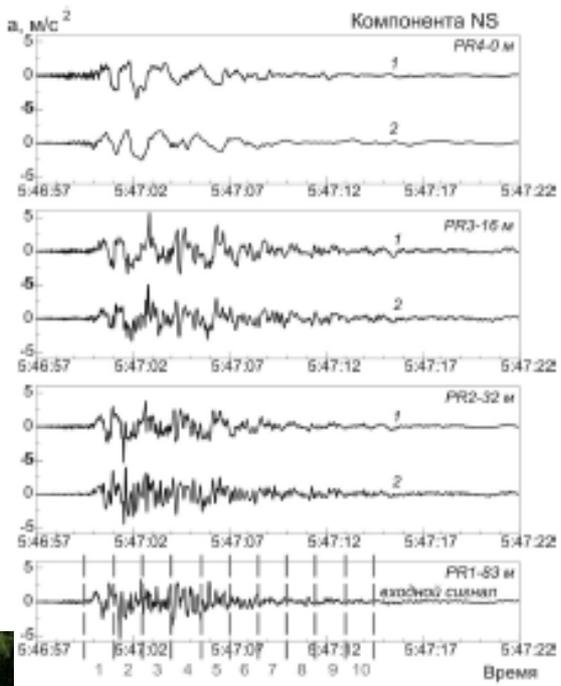
$$h \sim 20-70 \text{ м}$$



3. Нелинейность поведения грунта. Разжижение



Порт Айлэнд

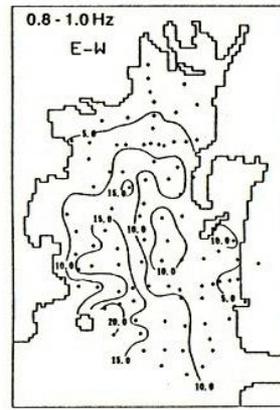
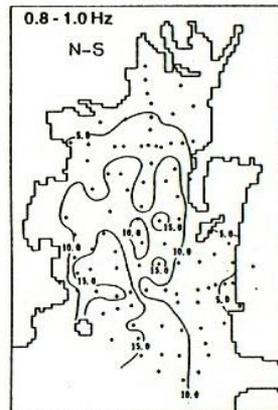
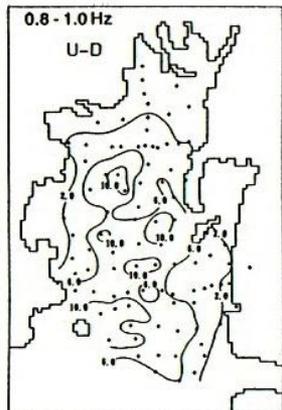
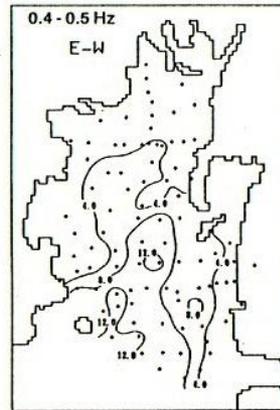
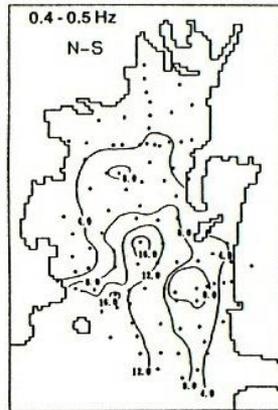
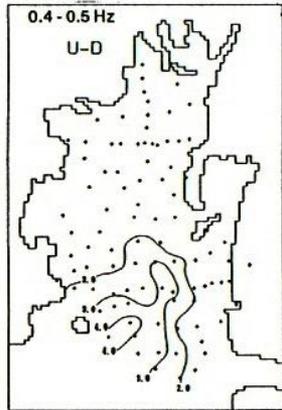
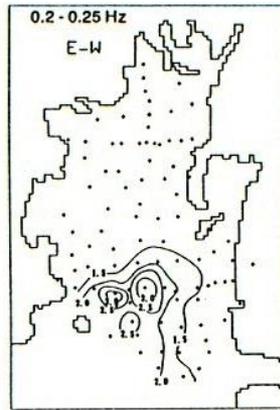
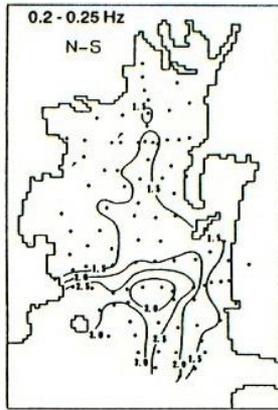
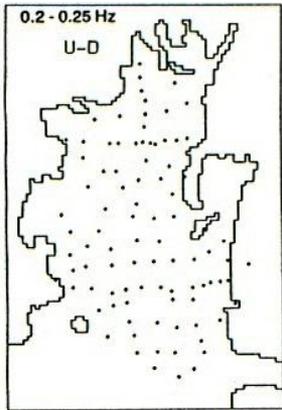


Землетрясение в Кобе 1995 г.
M ~ 6.8, Порт Айлэнд

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



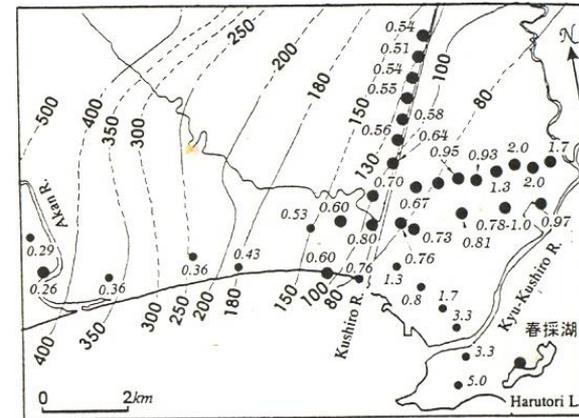
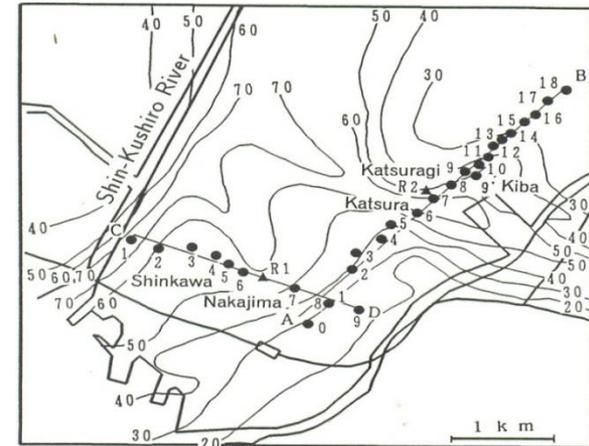
Изучение параметров грунтовых толщ в осадочных бассейнах



Microzonation of a sedimentary region based on comparative analysis of microseisms and gravity anomaly (J. Akamatsu, K. Nishimura, M. Komazawa), Proc. 5th 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



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

Top Introduction Download Topics User info Manual Links

PAGE ACCESS 0010205700
DATA DOWNLOAD 0220007800

Top Page

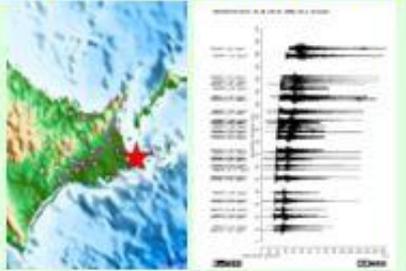
Important Announcement

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](#)

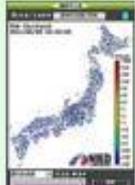
Link to Realtime ground-motion monitoring system (Kyochin monitor)

- Realtime ground-motion monitoring system
 

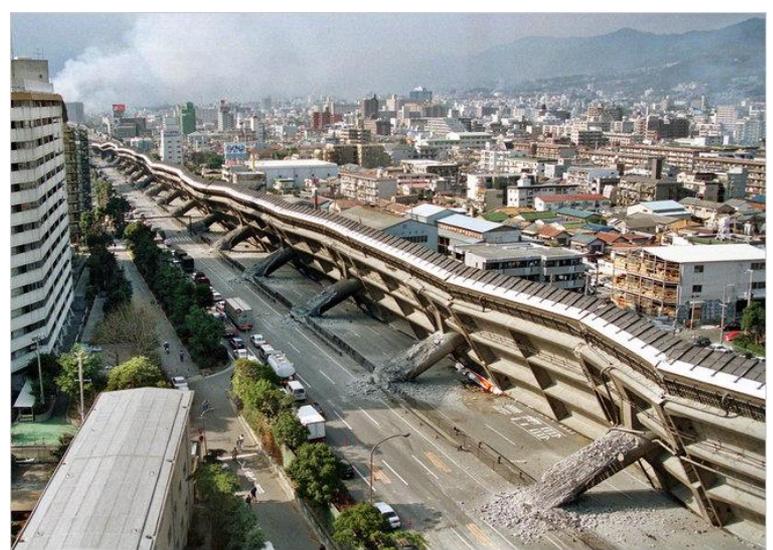
[Realtime ground-motion monitoring system \(Kyochin monitor\) #1](#)

[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



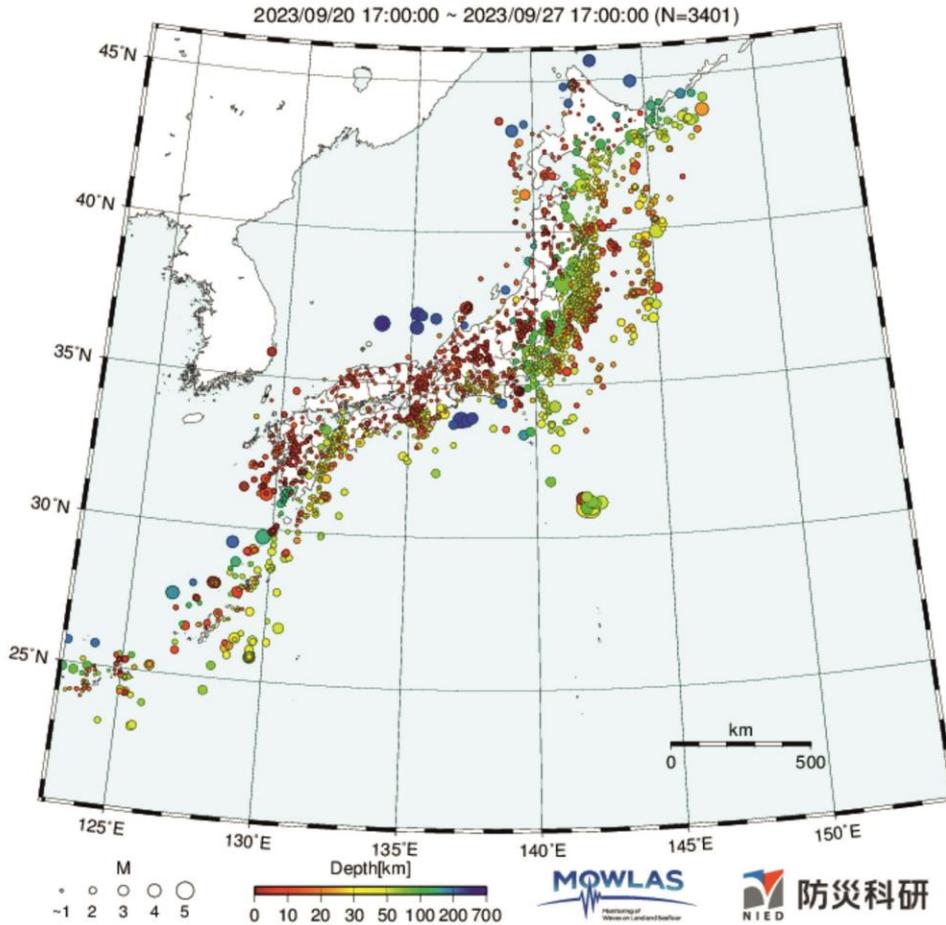
Hi-net Hypocenter Maps

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:

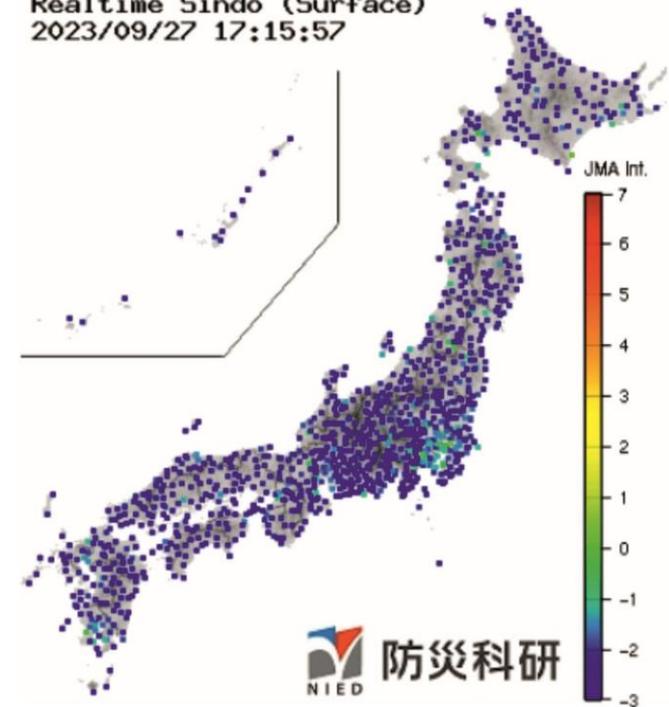
Prefecture Maps:

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



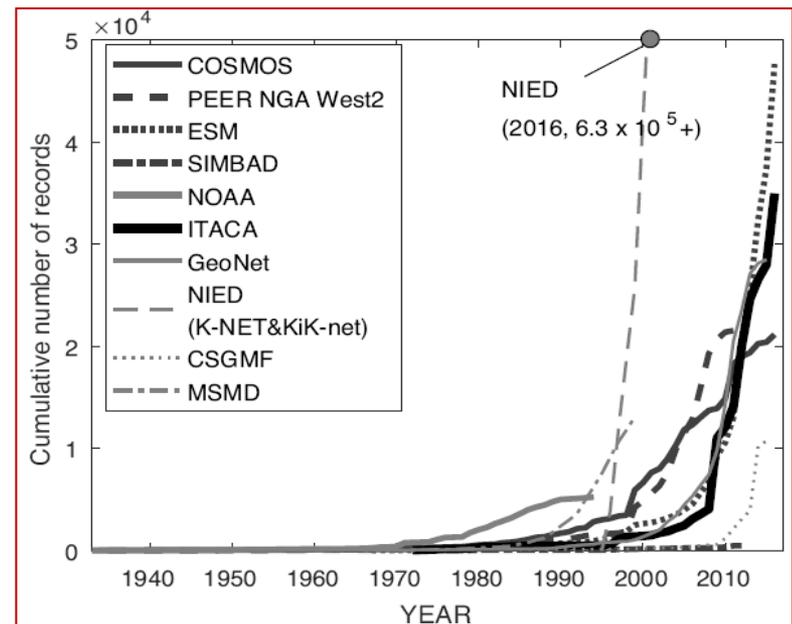
NIED - National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

Строительные нормы. Карты сейсмической опасности, учет региональных особенностей сейсмических очагов и путей распространения

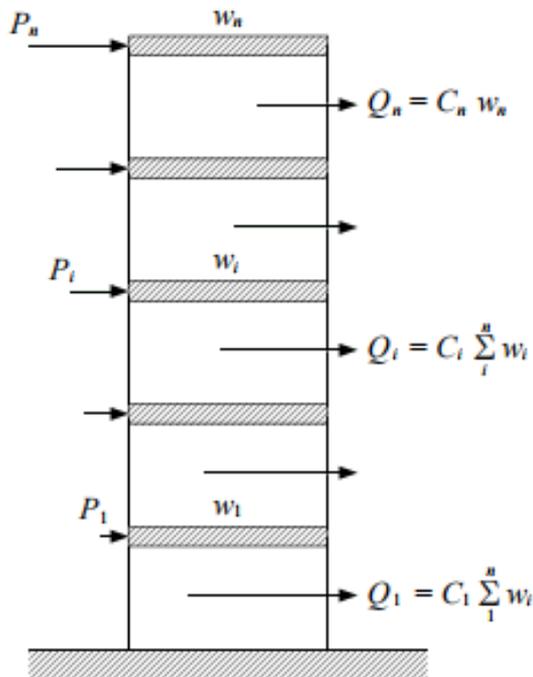
Существенный прогресс, достигнутый в последние десятилетия в оценках параметров сейсмических воздействий, связан с развитием в мире сетей сейсмических наблюдений

США ~13000 сейсмостанций,
Япония ~8000 сейсмостанций,
включая ~1000 вертикальных групп,
Иран ~1140 сейсмостанций,
Китай ~1000 сейсмостанций,
Турция и Италия по ~800 сейсмостанций,
Франция ~600 сейсмостанций,
Австралия, Греция, Швейцария по ~400 сейсмостанций,
Новая Зеландия ~200 сейсмостанций

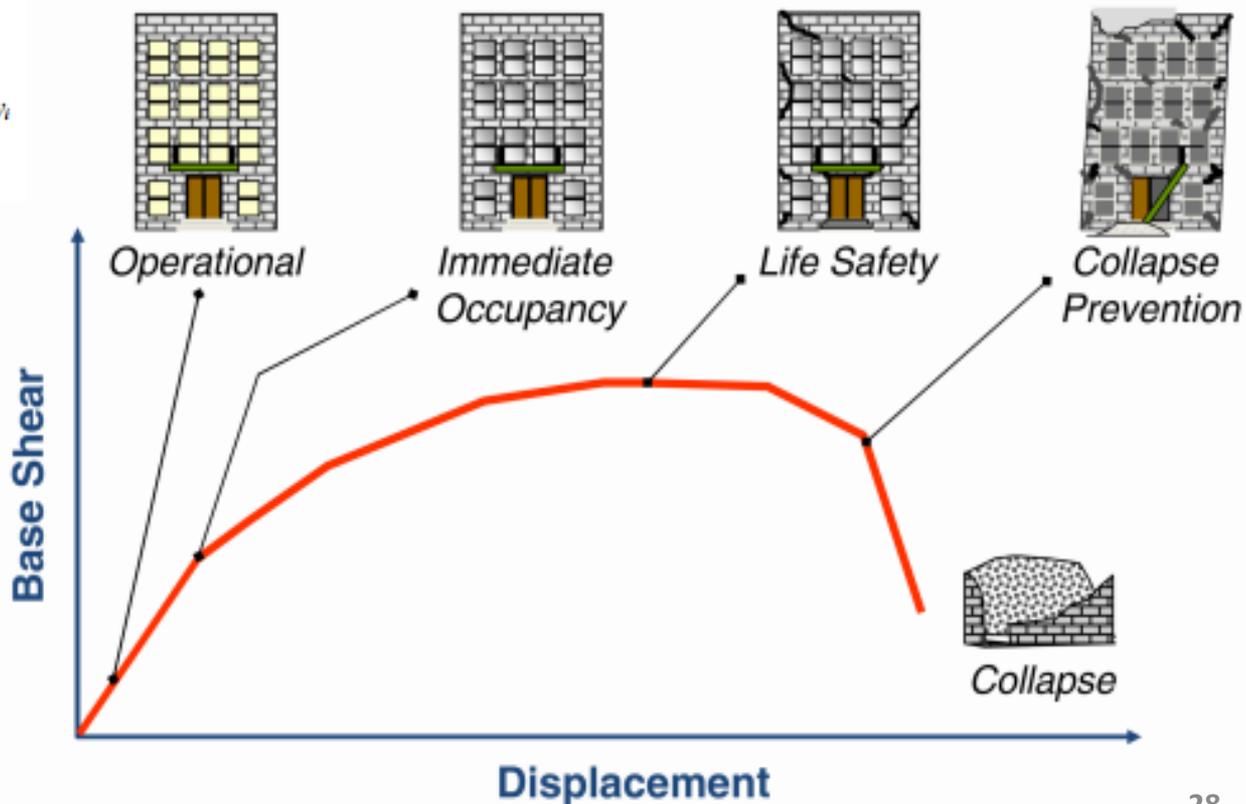
Российская Федерация ~360 сейсмостанций



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



Основные характеристики площадок, требуемые для сейсмостойкого проектирования и строительства – **пиковые ускорения (PGA) и скорости (PGV) и амплитуды спектров реакции**; оценки этих параметров желательно получить на скальных породах и на грунтах конкретных площадок



«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.

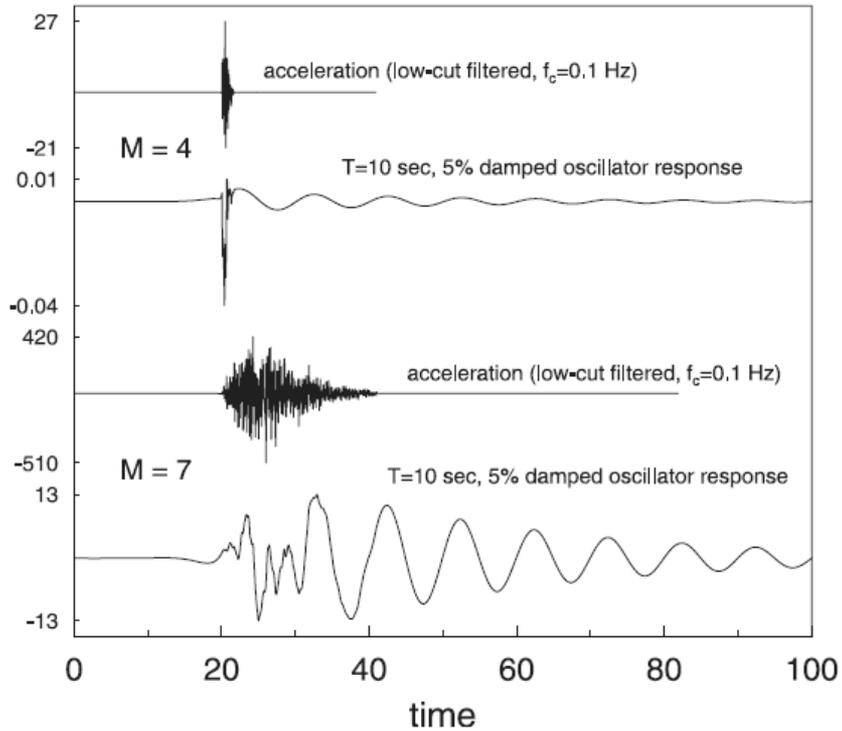
Поскольку любой параметр может быть получен из акселерограмм, мы должны рассчитывать акселерограммы для заданных пар источник–приемник с использованием современных методов **на основе современных знаний об очагах землетрясений, параметрах пути распространения и локальных условиях в точке приема».**



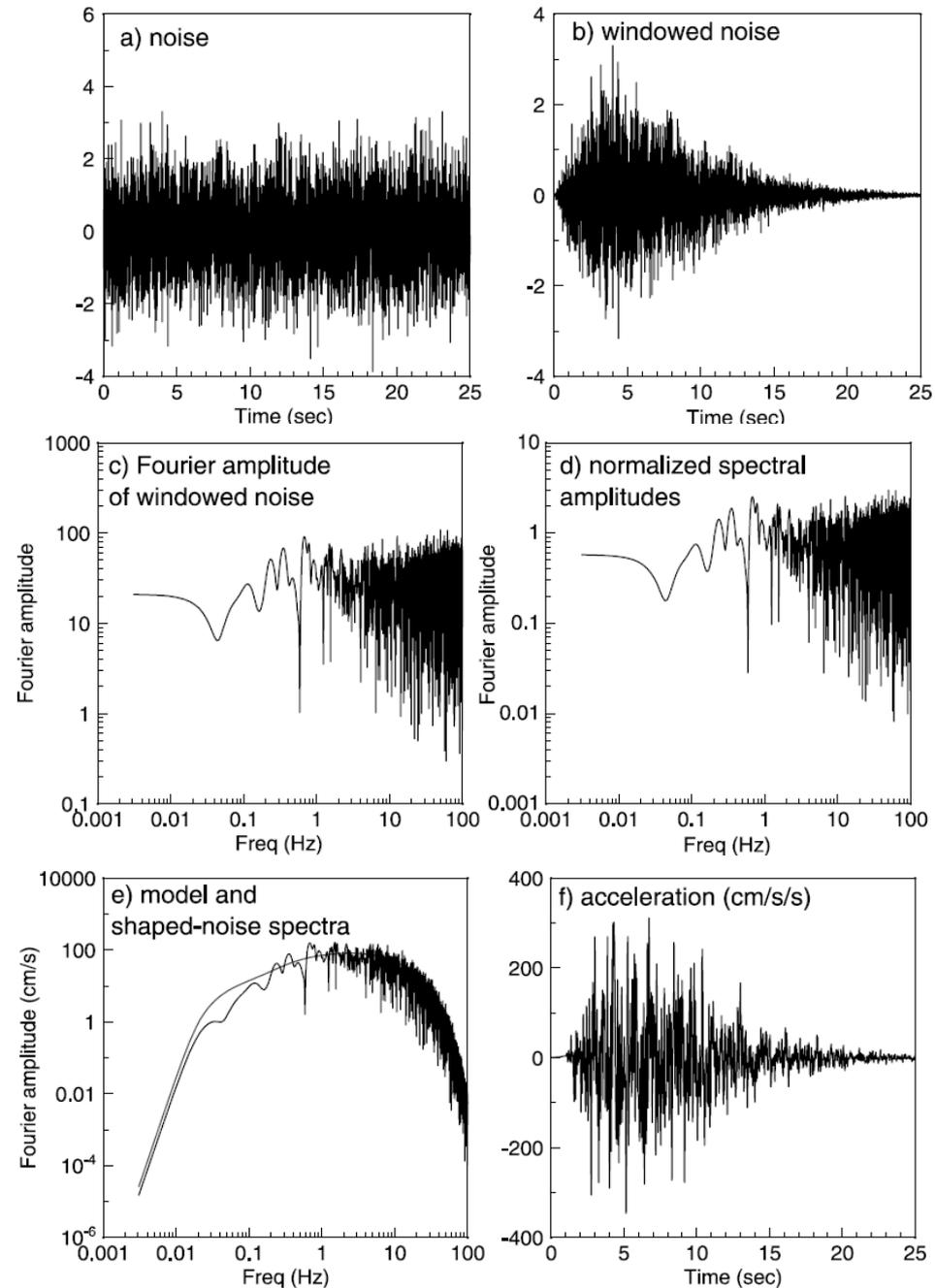
Aki, K., K. Irikura Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation, *Proc 4th Int. Conf. on Seismic Zonation, August 25-29, 1991, Stanford, California*, 1, 61-110.

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)



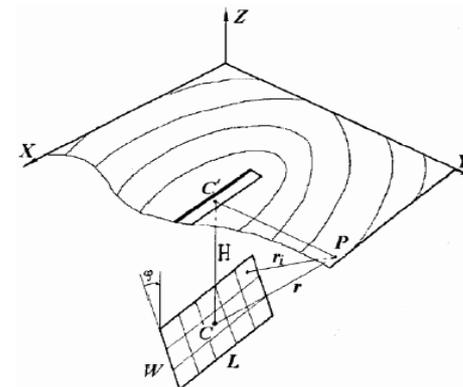
РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ

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



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

rho, beta, prtln, 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, (r_low(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_xtn

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

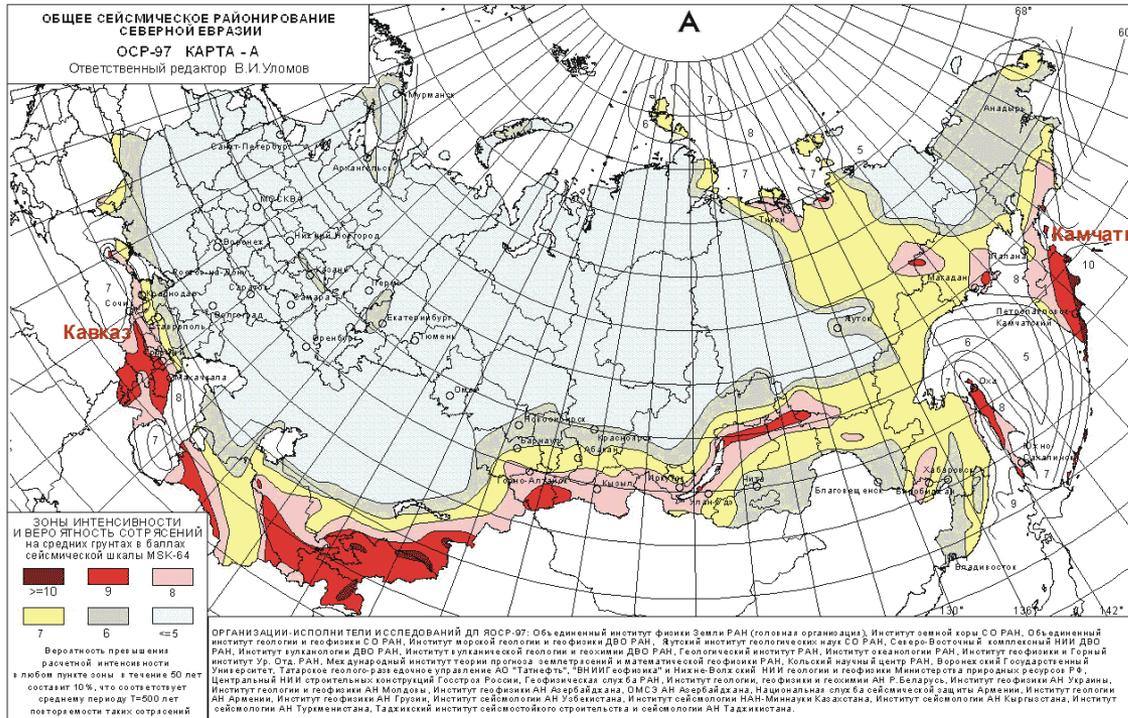
Карра: $\kappa = 0.07$ с

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

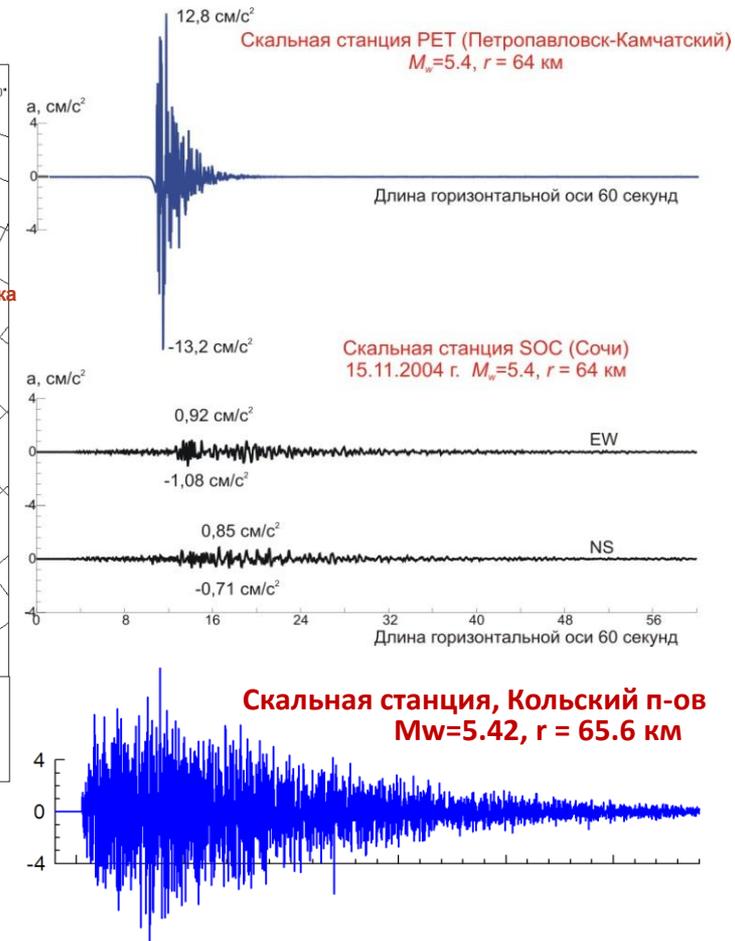
Плотность коры: 2.6 г/см³

параметры усиления
сейсмических волн в земной
коре

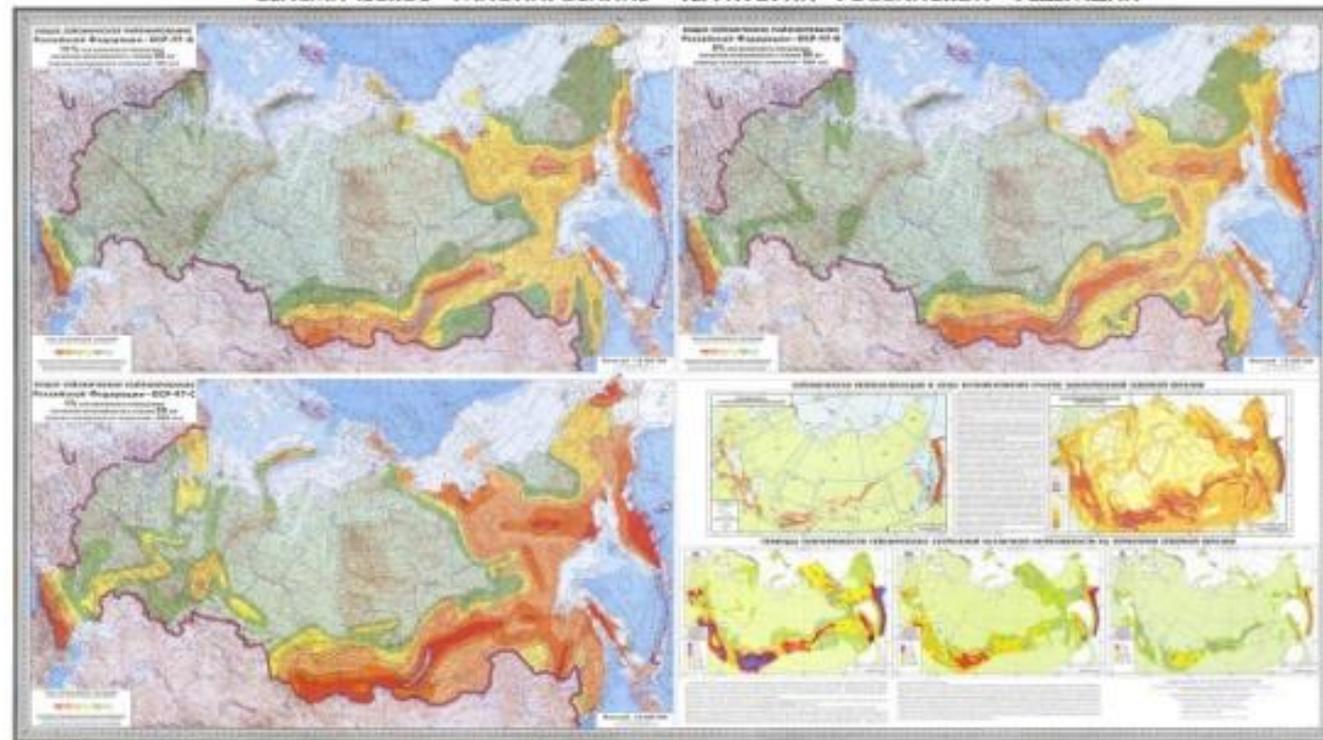
Различия региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн на территории России



Доклады АН, 2011, 438, 5, 687-693



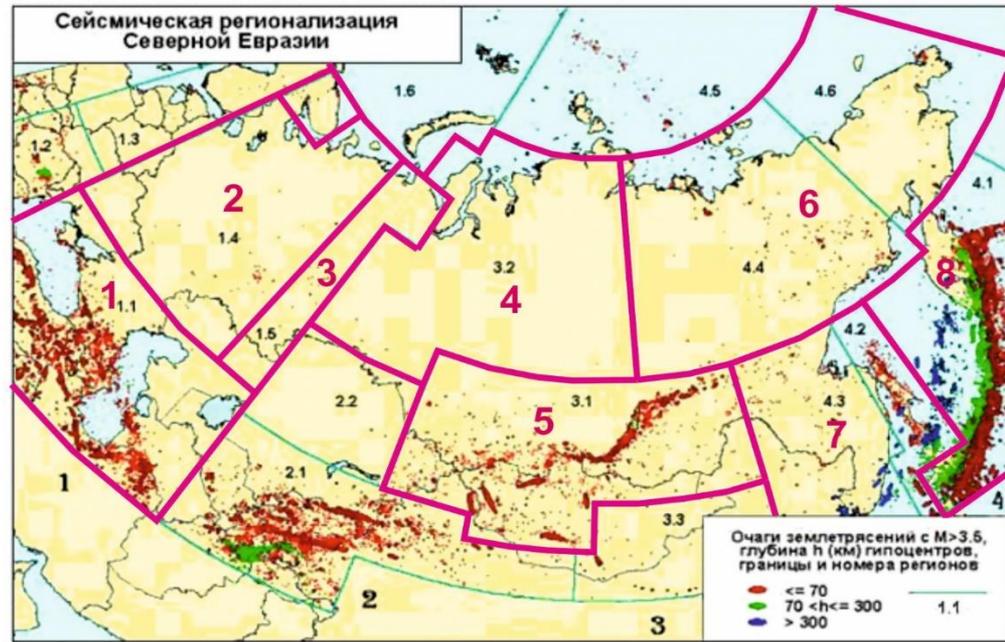
Пиковые ускорения (PGA) при фиксированных магнитуде и расстоянии M и R существенно различаются от региона к региону – для **субдукционных** (Камчатка), **коровых** (Кавказ, Байкальская зона) землетрясений и землетрясений **стабильных континентальных плит** (Кольский полуостров)



Валентин Иванович Уломов



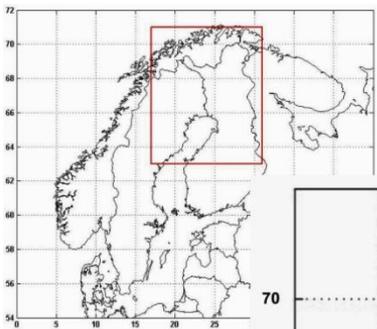
Александр Александрович Гусев



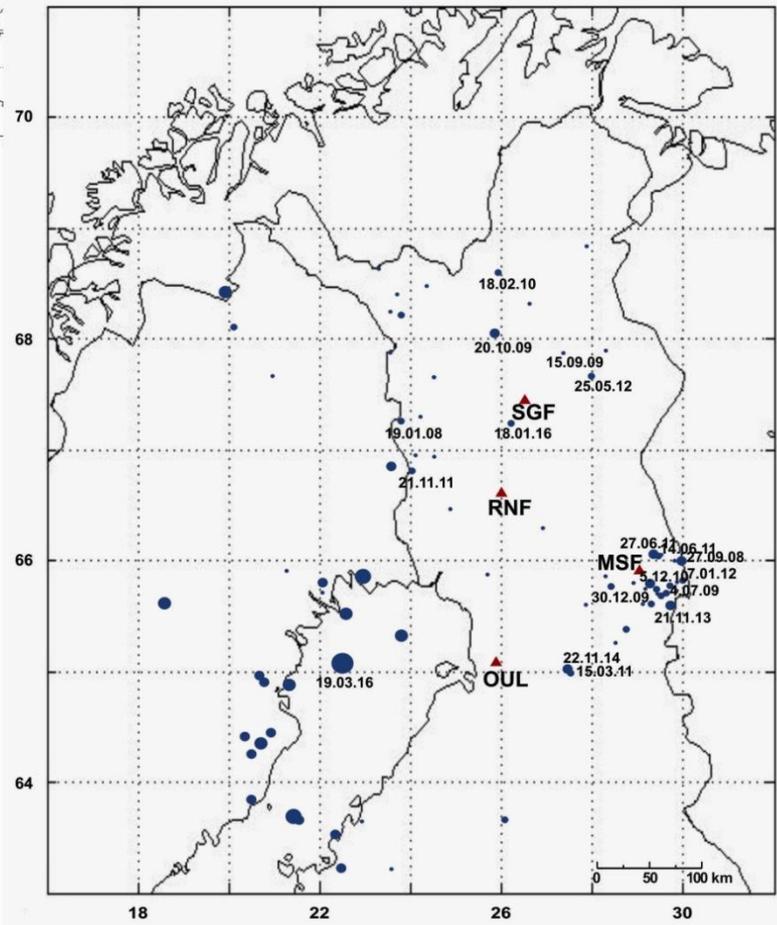
НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



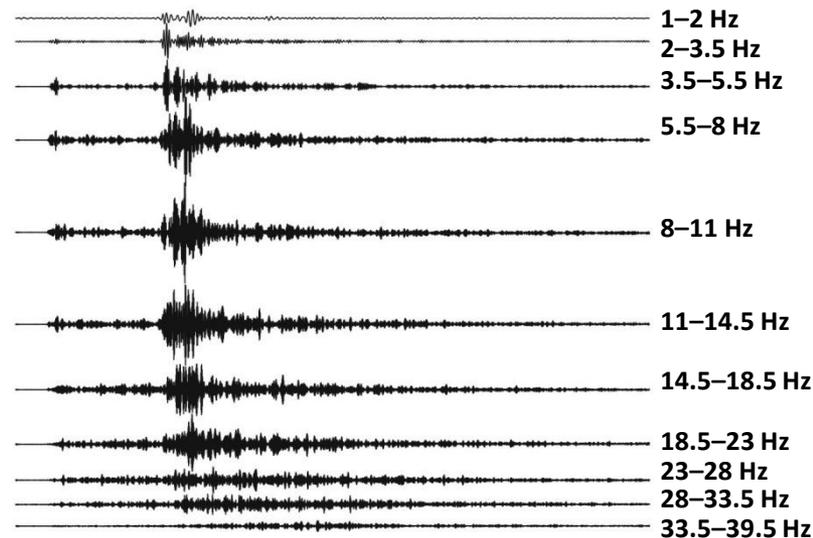
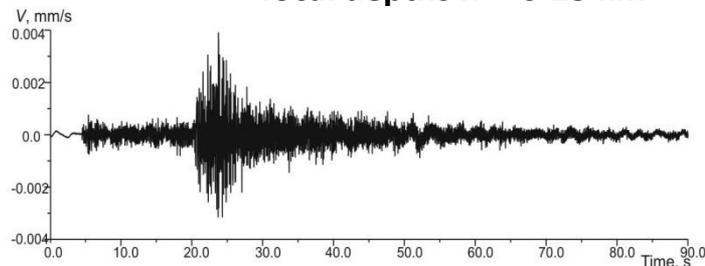
Кольский полуостров и Карелия



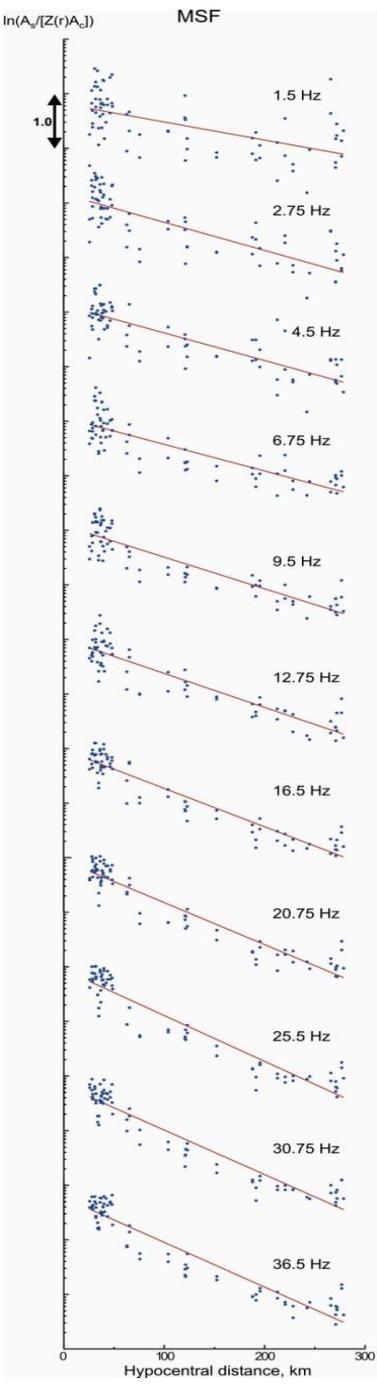
Сейсмическая сеть северной Финляндии



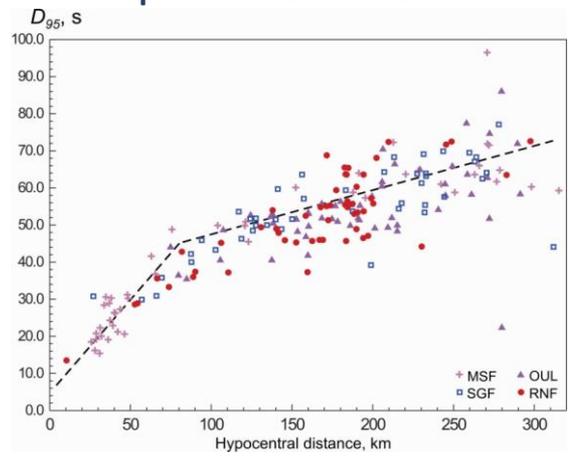
~80 earthquakes with $M_w \sim 1.5 - 4.1$ and focal depths $h \sim 0-25$ km



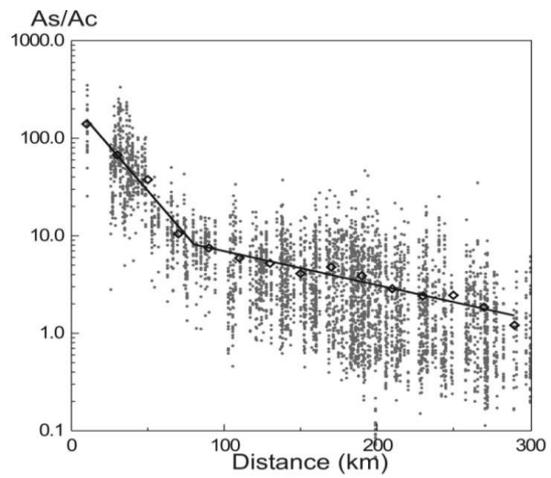
Велосиграмма землетрясения 30 декабря 2009 г., $M=2.2$ запись станции OUL, $r = 137.5$ км, и полосовая фильтрация



Зависимость длительности от расстояния от очага

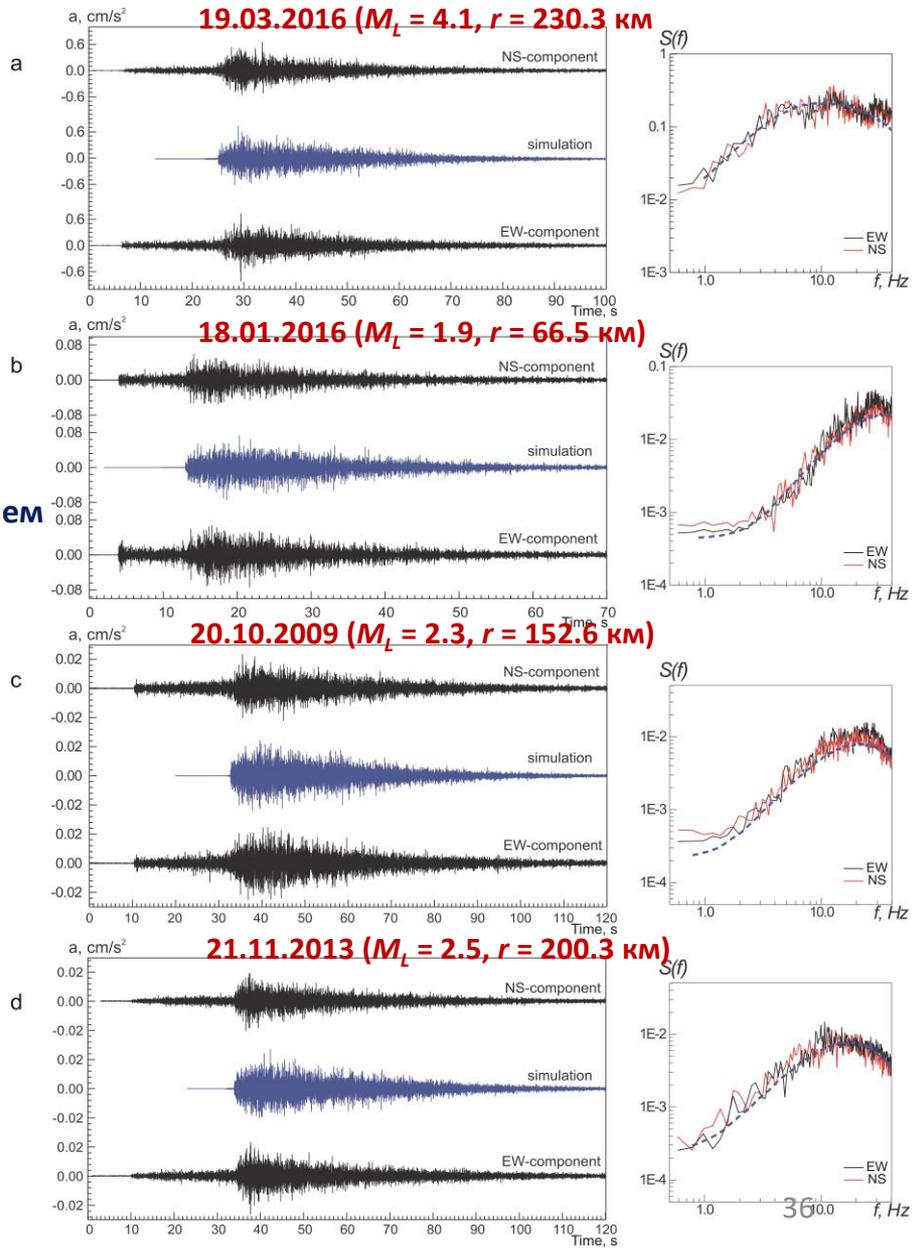


Снижение интенсивности с расстоянием

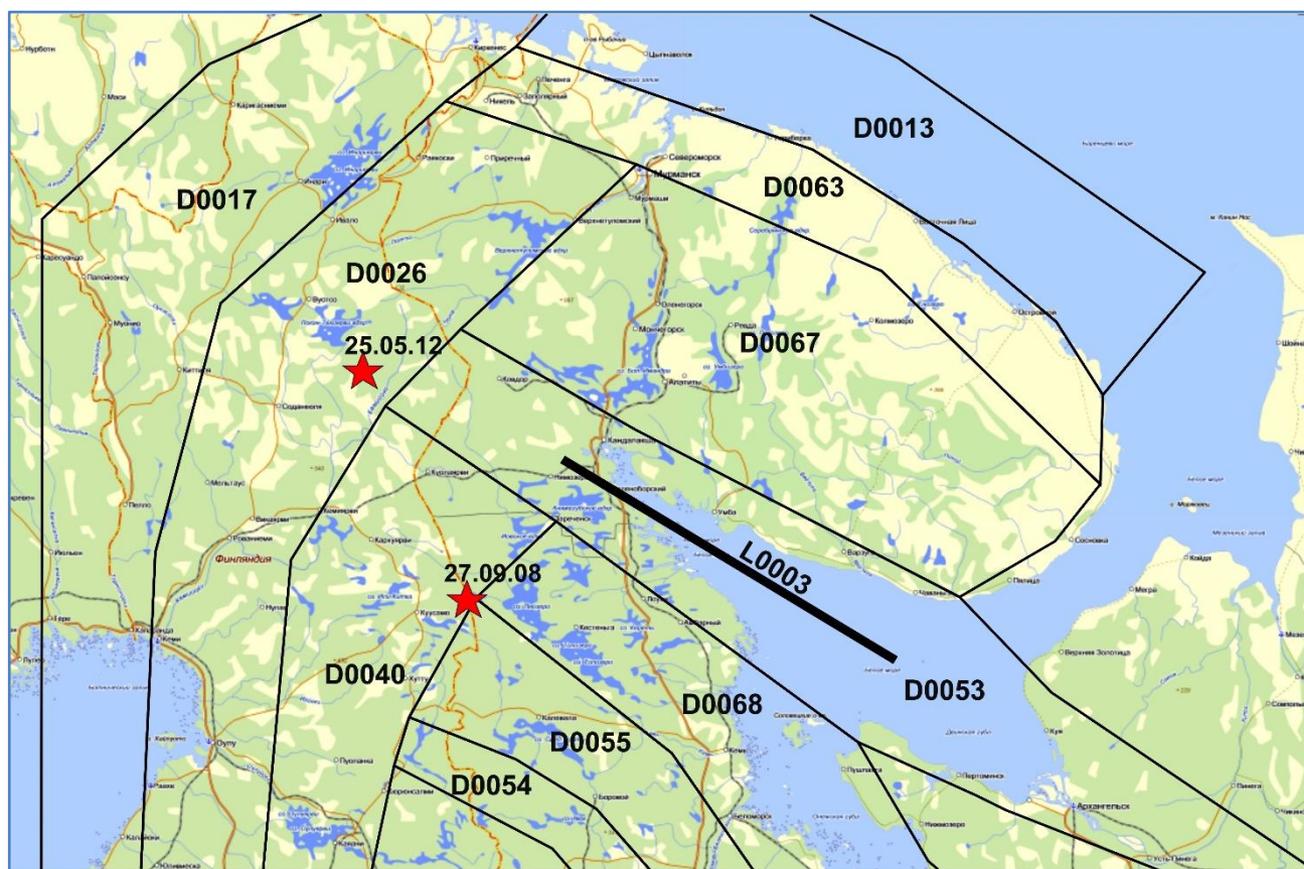


$Q(f) \sim 80 \cdot f^{1.2}$ при $R \leq 50$ км
 $\sim 100 \cdot f^{1.1}$ при $50 \text{ км} < R \leq 100$ км
 $\sim 150 \cdot f^{1.0}$ при $100 \text{ км} < R < 200$ км
 $\sim 220 \cdot f^{0.85}$ при $R \geq 200$ км

Акселерограммы, смоделированные и рассчитанные, и соответствующие спектры Фурье



Сейсмогенные структуры – линеаменты и домены



$$\Delta\sigma \sim 200 \text{ бар}$$

$$1/R \text{ при } R < 80 \text{ км}$$

$$1/R^{0.5} \text{ при } R > 80 \text{ км}$$

$$Q(f) \sim 80 \cdot f^{1.2} \text{ при } R \leq 50 \text{ км}$$

$$\sim 100 \cdot f^{1.1} \text{ при } 50 \text{ км} < R \leq 100 \text{ км}$$

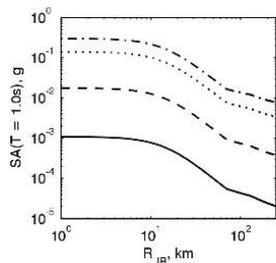
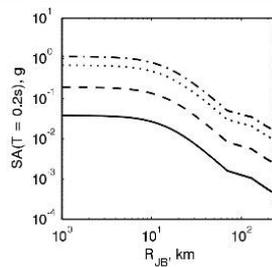
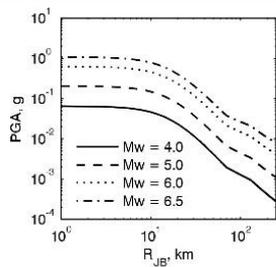
$$\sim 150 \cdot f^{1.0} \text{ при } 100 \text{ км} < R < 200 \text{ км}$$

$$\sim 220 \cdot f^{0.85} \text{ при } R \geq 200 \text{ км}$$

$$A(f) \sim 1.0$$

$$k \sim 0,012 \text{ с}$$

$$3.3 \text{ км/с} \quad 2.6 \text{ г/см}^3$$



**PGA и амплитуды
спектра реакции SA
как функции R_{JB}**

**GMPE – уравнения прогноза движений грунта
для Кольского полуострова и Карелии**

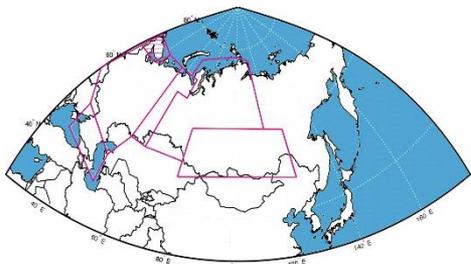
$$\log(Y) = f_1 + f_2 + f_3 + \varepsilon\sigma$$

$$f_1 = c_1 + c_2(M - 6.5) + c_3(M - 6.5)^2$$

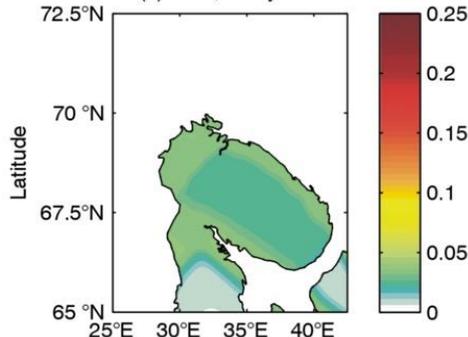
$$f_2 = c_4 \log\left(\sqrt{R_{JB}^2 + c_7^2}\right) + (c_5 + c_6 M)R_{JB}$$

$$f_3 = \begin{cases} 0, & R_{JB} \leq 70 \\ c_8[\log(R_{JB}) - \log(70)], & 70 < R_{JB} \leq 130 \\ c_8[\log(R_{JB}) - \log(70)] + c_9[\log(R_{JB}) - \log(130)], & 70 < R_{JB} \leq 130 \end{cases}$$

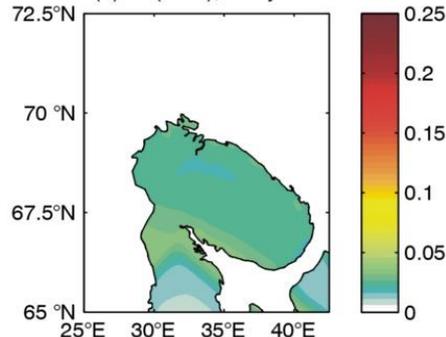
Карты PGA и SA (0.2 с и 1.0 с) для Кольского полуострова и Карелии – региона стабильной континентальной сейсмичности



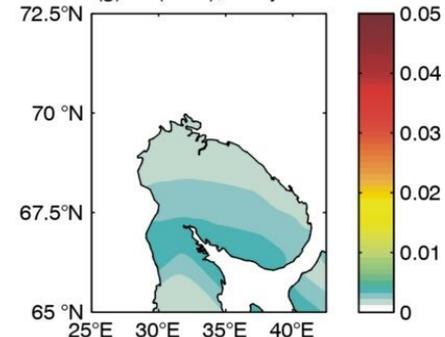
(a) PGA, 475 years



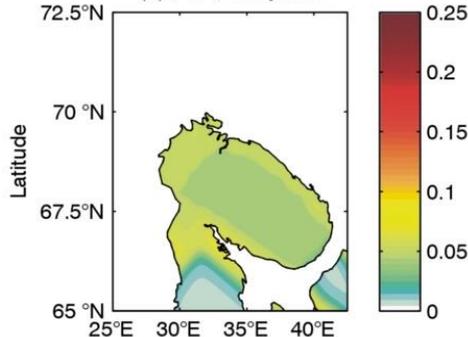
(d) SA(0.2 s), 475 years



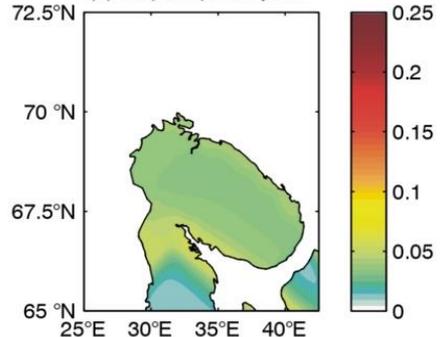
(g) SA(1.0 s), 475 years



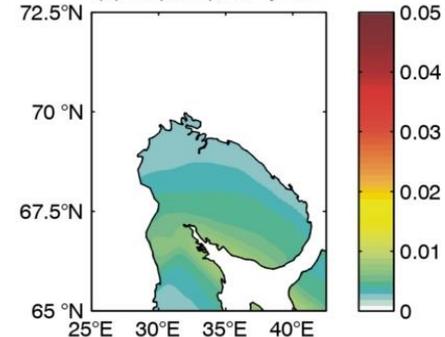
(b) PGA, 975 years



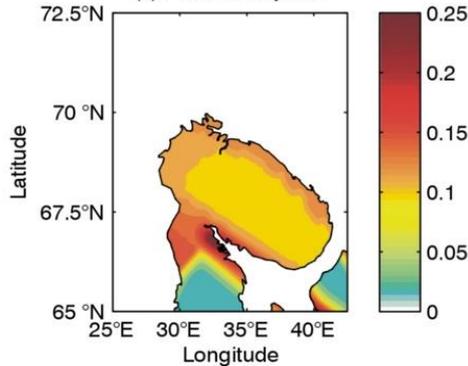
(e) SA(0.2 s), 975 years



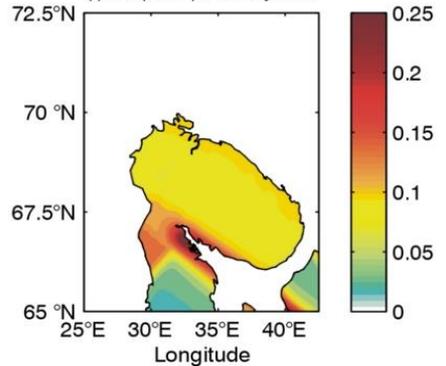
(h) SA(1.0 s), 975 years



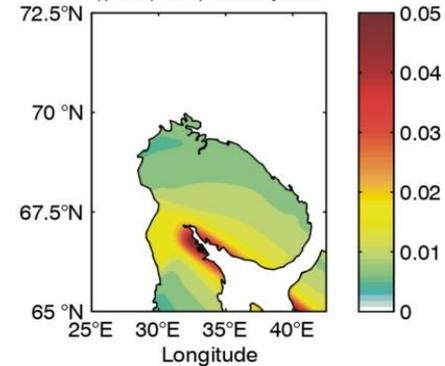
(c) PGA, 4975 years

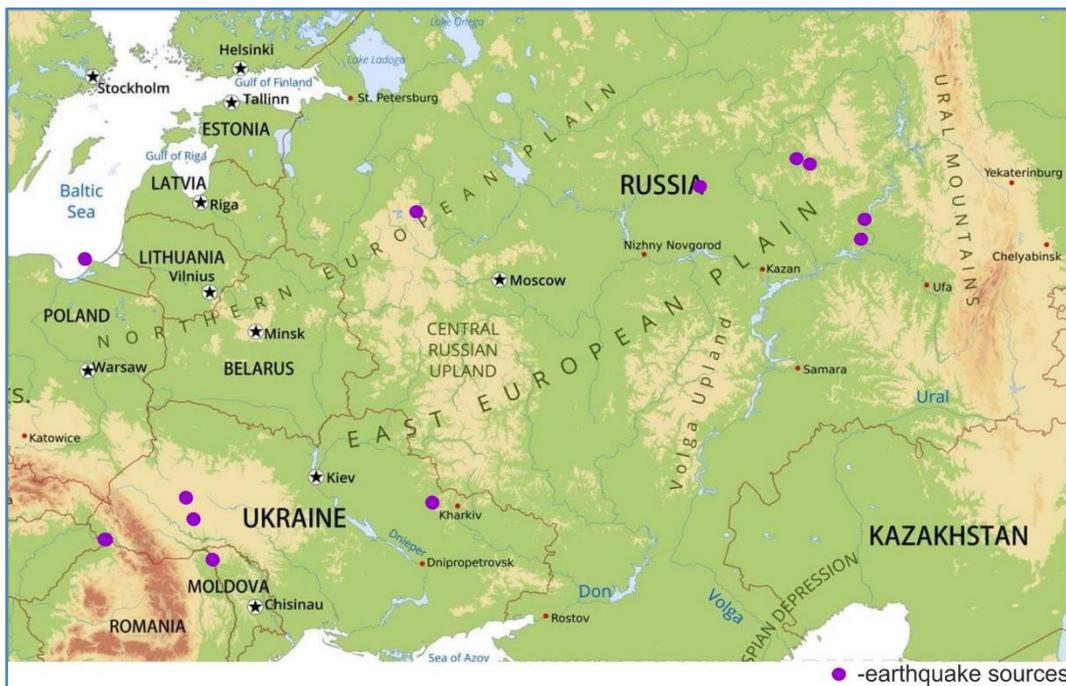


(f) SA(0.2 s), 4975 years

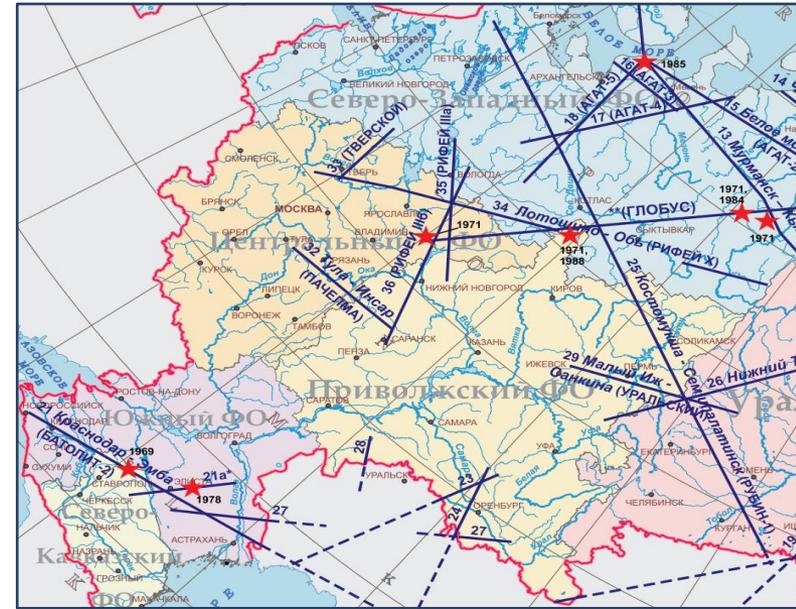


(i) SA(1.0 s), 4975 years





Восточно-Европейская платформа



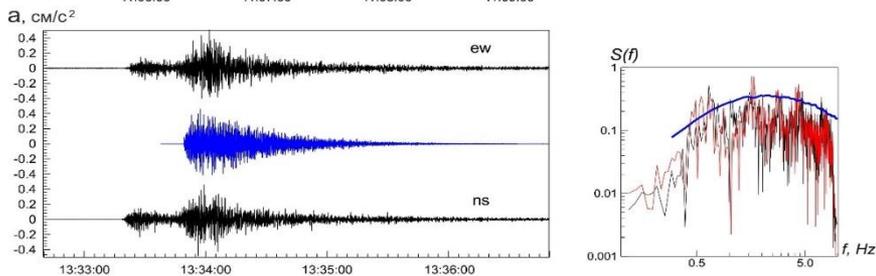
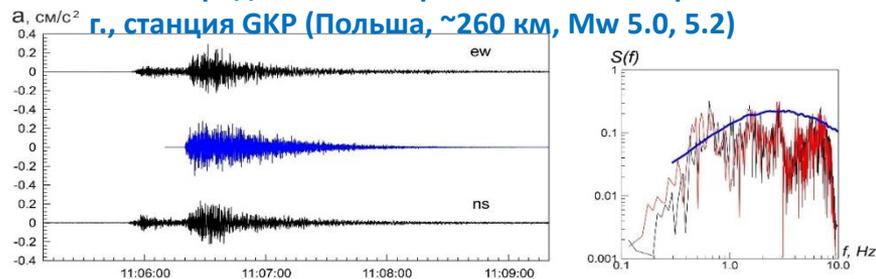
Станция	Дата	M	координаты		h, км	Rh, км	D ₉₅ , с		Q(f)
ARU	2.06.2011	mb3.1	56.60	53.01	10	337	198	198	-
ARU	2.06.2011	mb3.2	57.10	53.17	10	342	86	70	-
KIEV	19.01.2000	mb3.6	48.05	26.83	10	333	34	72	200 f ^{0.9}
KIEV	3.01.2002	mb4.0	49.46	25.62	29	291	14	14	185 f ^{0.95}
KIEV	23.11.2006	mb4.8	48.35	22.59	13	542	56	24	185 f ^{1.03}
KIEV	14.05.2010	mb3.1	49.75	35.25	10	442	72	64	215 f ^{0.95}
KIEV	23.09.2021	mb4.5	48.97	25.98	16	298	26	28	215 f ^{0.95}
GKP	21.09.2004	Mw5.0	54.924	20.12	16	259	40	44	165 f ^{1.05}
GKP	21.09.2004	Mw5.2	54.876	20.12	20	256	52	48	205 f ^{0.95}
WAR	21.09.2004	Mw5.0	54.924	20.12	16	293	42	56	180 f ^{1.05}
WAR	21.09.2004	Mw5.2	54.876	20.12	20	289	74	110	180 f ^{1.15}
MHVAR	13.09.2013	ML2.8	57.29	33.69	5?	355	64	78	-
KIRV	3.07.2015	mb3.6	57.92	46.01	10	212	40	38	160 f ^{0.97}
KIRV	16.09.2020	ML2.8	58.62	50.21	10	47	8	12	165 f ^{1.0}
KIRV	26.12.2023	ML3.3	58.48	50.79	4	81	48	44	177 f ^{0.92}

Профили ГСЗ (глубинного сейсмического зондирования) использованы для оценки



Акселерограммы и спектры горизонтальных компонент, зарегистрированные и смоделированные

2 Калининградских землетрясения 21 сентября 2004



15 записей землетрясений

Уравнения прогноза движений грунта (УПДГ):

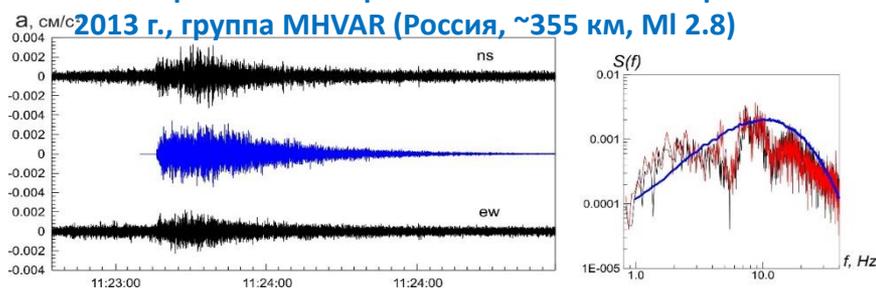
$$\log(Y) = f_1 + f_2 + f_3 + \varepsilon\sigma$$

$$f_1 = c_1 + c_2M + c_3(8.5 - M)^2$$

$$f_2 = c_4 \log\left(\sqrt{R_{JB}^2 + [c_7 \exp(c_8M)]^2}\right) + (c_5 + c_6M)R_{JB}$$

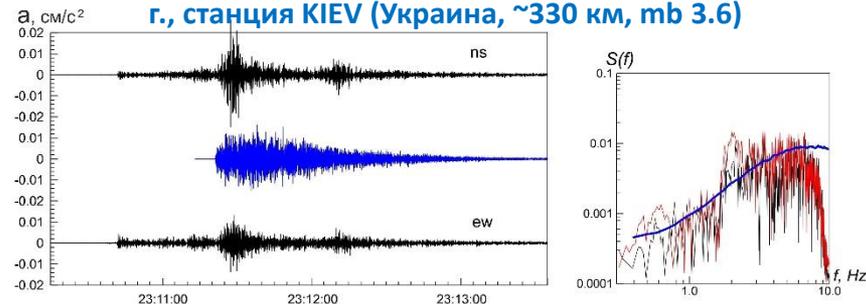
$$f_3 = \begin{cases} 0, R_{JB} \leq 50 \\ c_9[\log(R_{JB}) - \log(50)], 50 < R_{JB} \leq 150 \\ c_9[\log(R_{JB}) - \log(70)] + c_{10}[\log(R_{JB}) - \log(150)], 50 < R_{JB} \leq 150 \end{cases}$$

Землетрясение в Тверской области 13 сентября



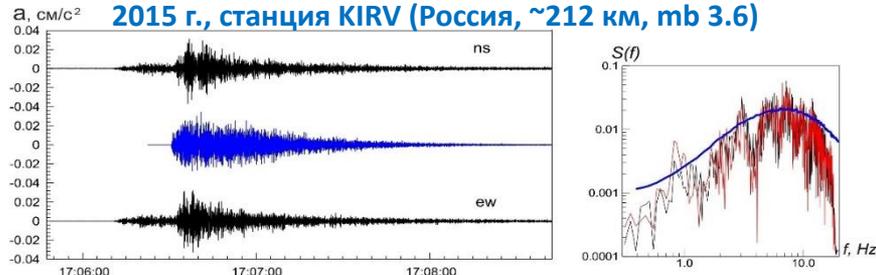
Землетрясение в Молдове 19 января 2000

г., станция KIEV (Украина, ~330 км, mb 3.6)



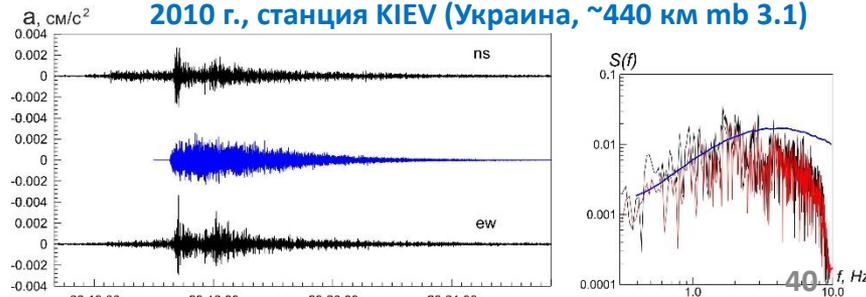
Землетрясение в Кировской области 3 июля

2015 г., станция KIRV (Россия, ~212 км, mb 3.6)

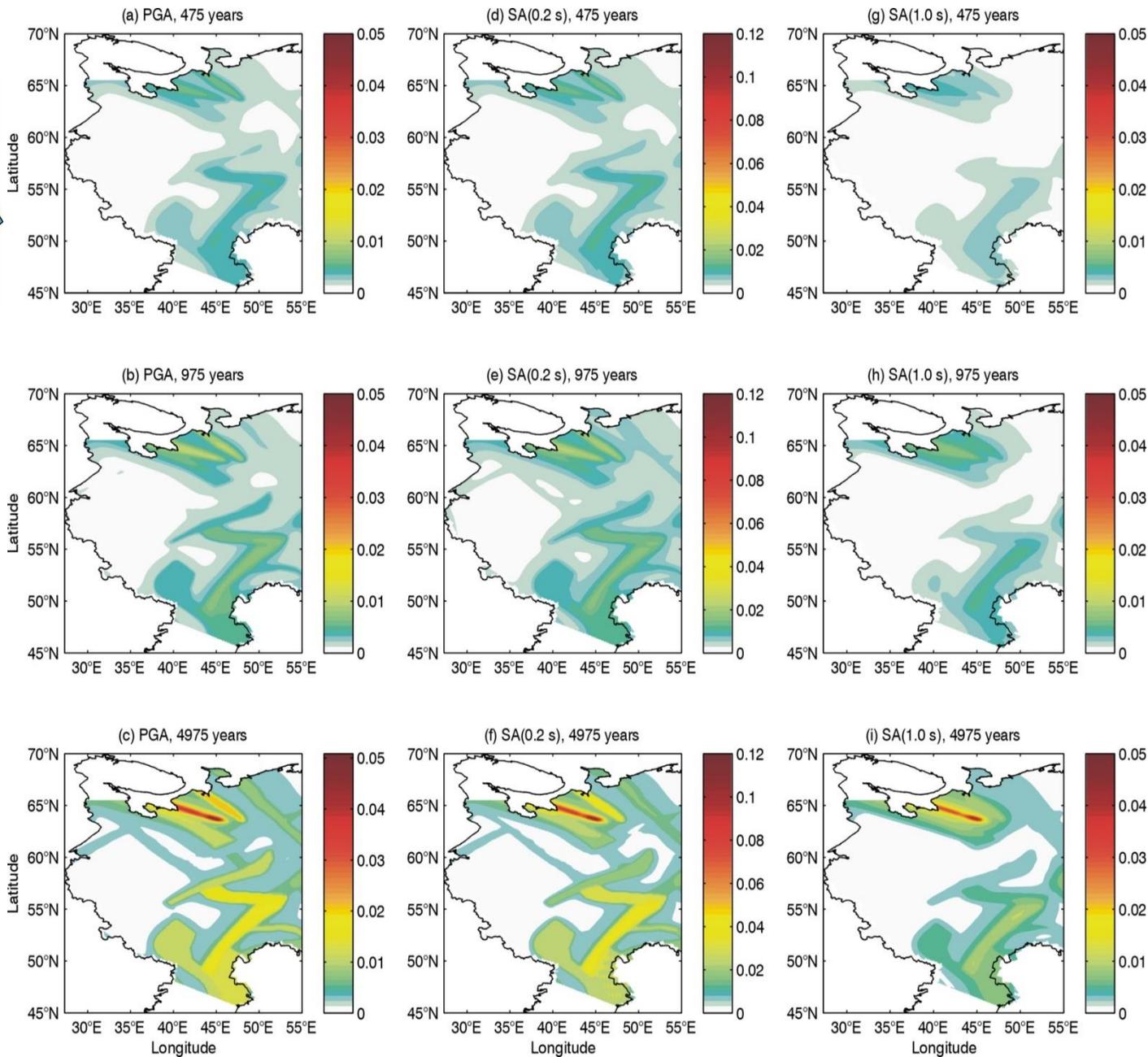
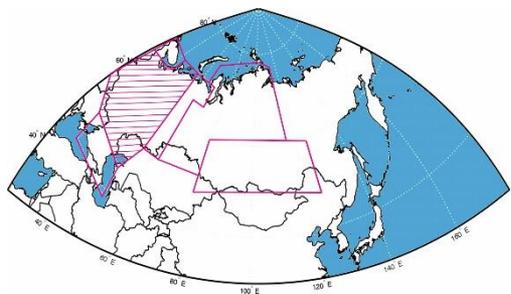


Землетрясение в Харьковской области 14 мая

2010 г., станция KIEV (Украина, ~440 км, mb 3.1)



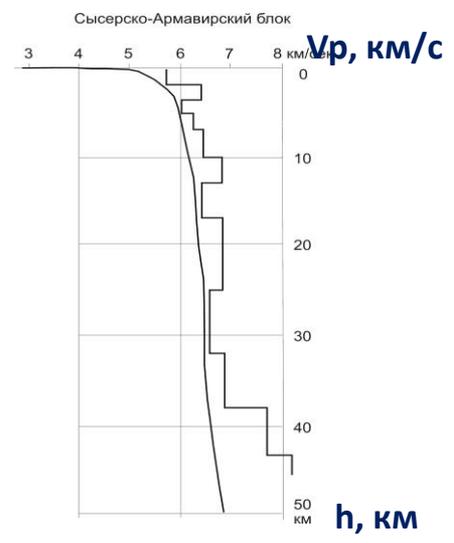
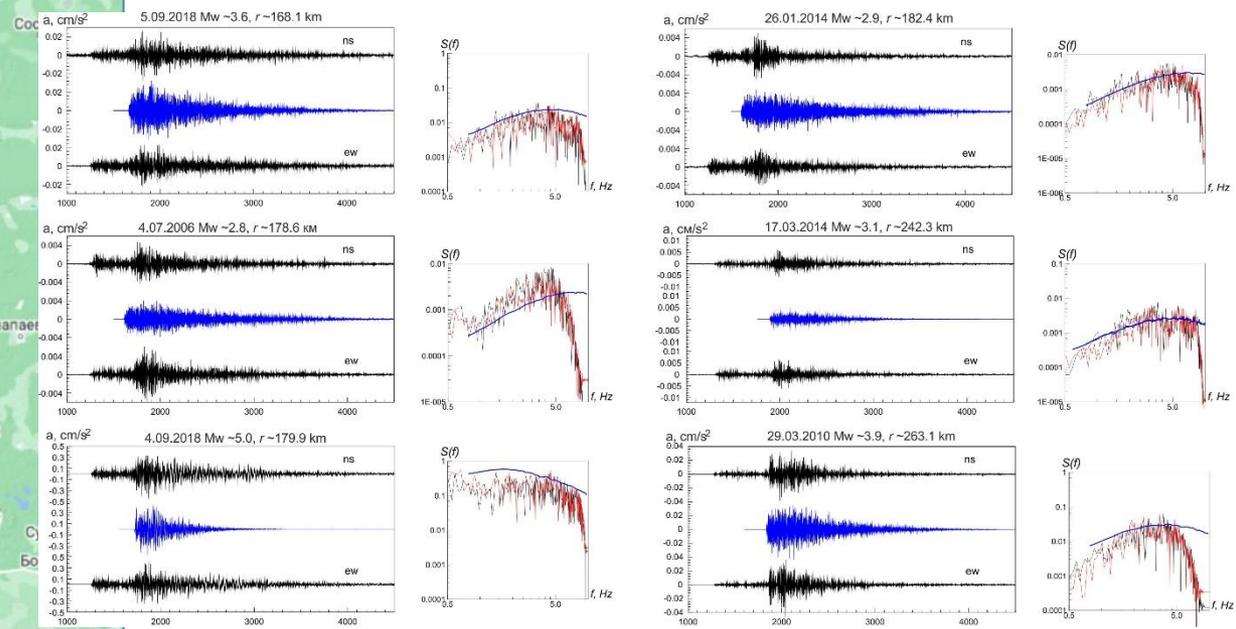
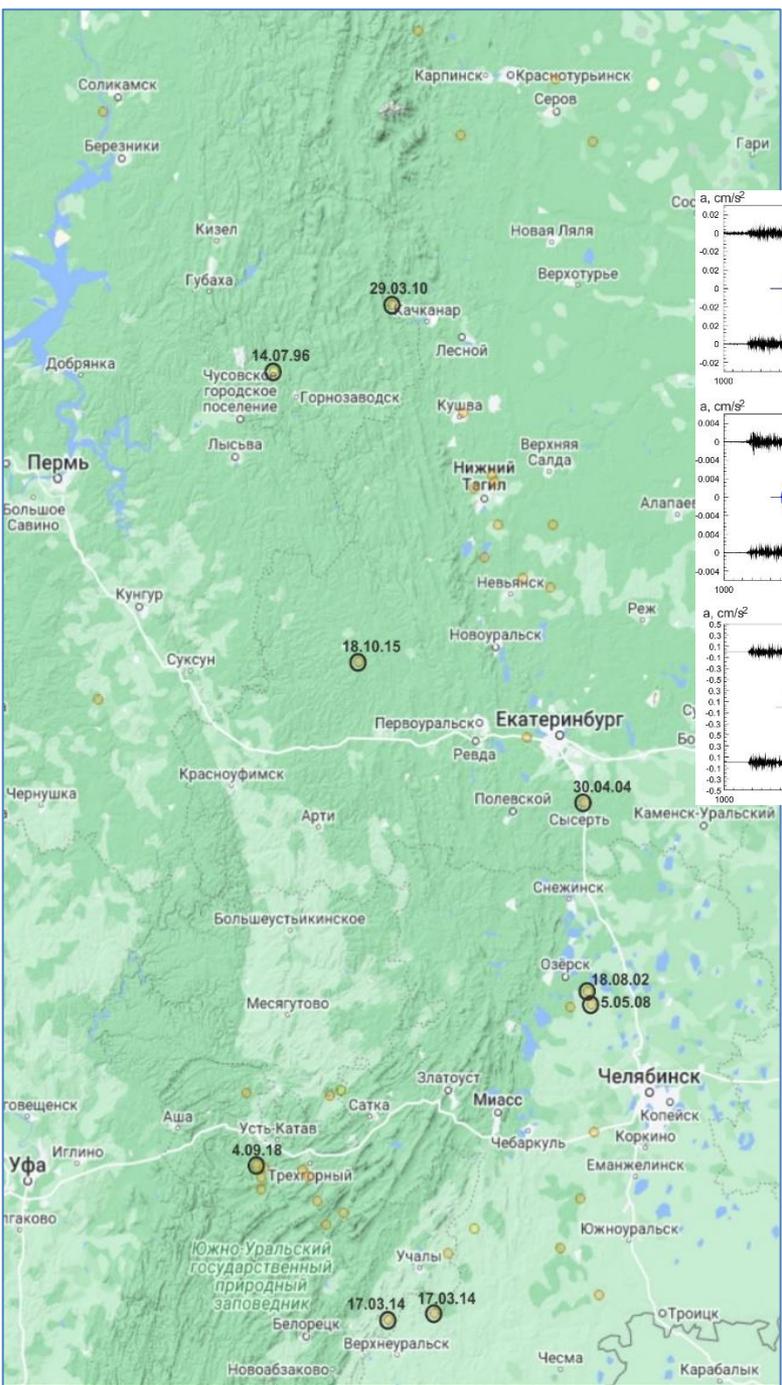
Карты PGA и SA (0.2 с and 1.0 с) для Восточно-Европейской платформы – региона стабильной континентальной сейсмичности



$\Delta\sigma \sim 50$ бар
$1/R$ при $R < 50$ км
$1/50$ при $50 \leq R < 150$ км
$1/R^{0.5}$ при $R > 150$ км
$Q(f) \sim 180 \cdot f^{1.0}$ for $R < 200$ км
$\sim 190 \cdot f^{1.0}$ for $R > 200$ км
$A(f) \sim 1.0$
$k \sim 0,03$ с
3.8 км/с 2.6 г/см³

Урал

12 записей землетрясений



$\Delta\sigma \sim 50$ бар
$1/R$ при $R < 50$ км $1/50$ при $50 \leq R < 150$ км $1/R^{0.5}$ при $R > 150$ км
$Q(f) \sim 130 \cdot f^{0.6}$ при $R < 200$ км $\sim 150 \cdot f^{0.7}$ при $R > 200$ км
$A(f) \sim 1.0$
$k \sim 0,02$ с
3.8 км/с 2.6 г/см ³

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

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

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

F_M и F_D – описывают эффекты очага и пути распространения,

M - магнитуда, R - расстояние,

ε – описывает разброс наблюдаемых значений $\ln(Y)$ относительно модели, σ – стандартное отклонение

коэффициенты УПДГ, не зависящие от периода

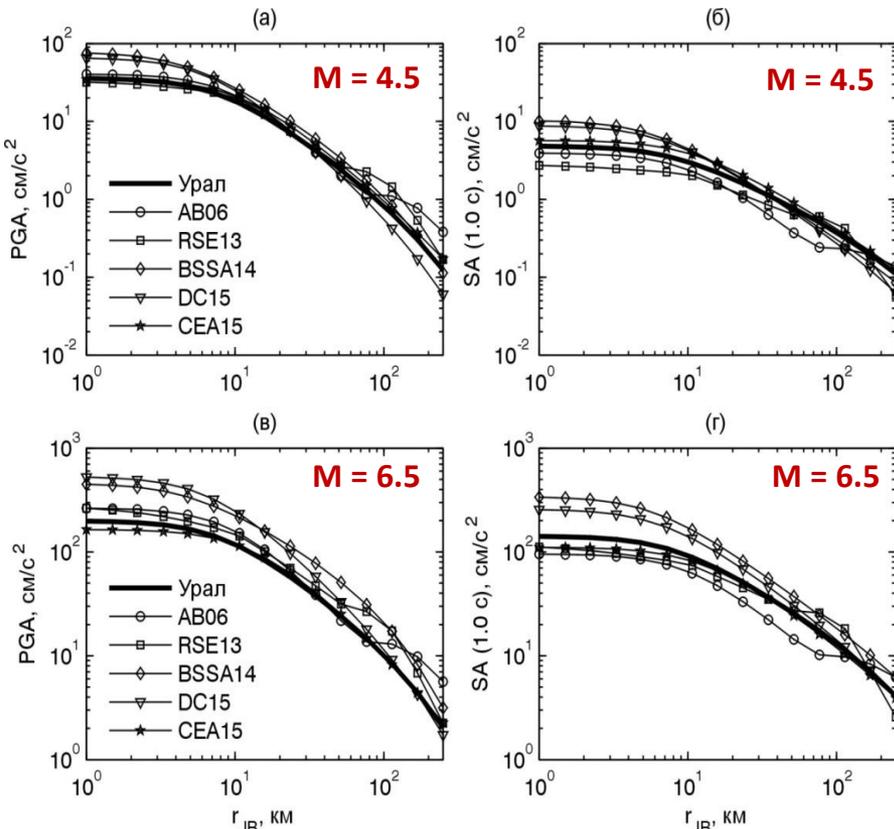
$M = 4 - 7$, $R = 1 - 250$ км

$T \sim 0.02$ с - 10 с

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

коэффициенты УПДГ, зависящие от периода

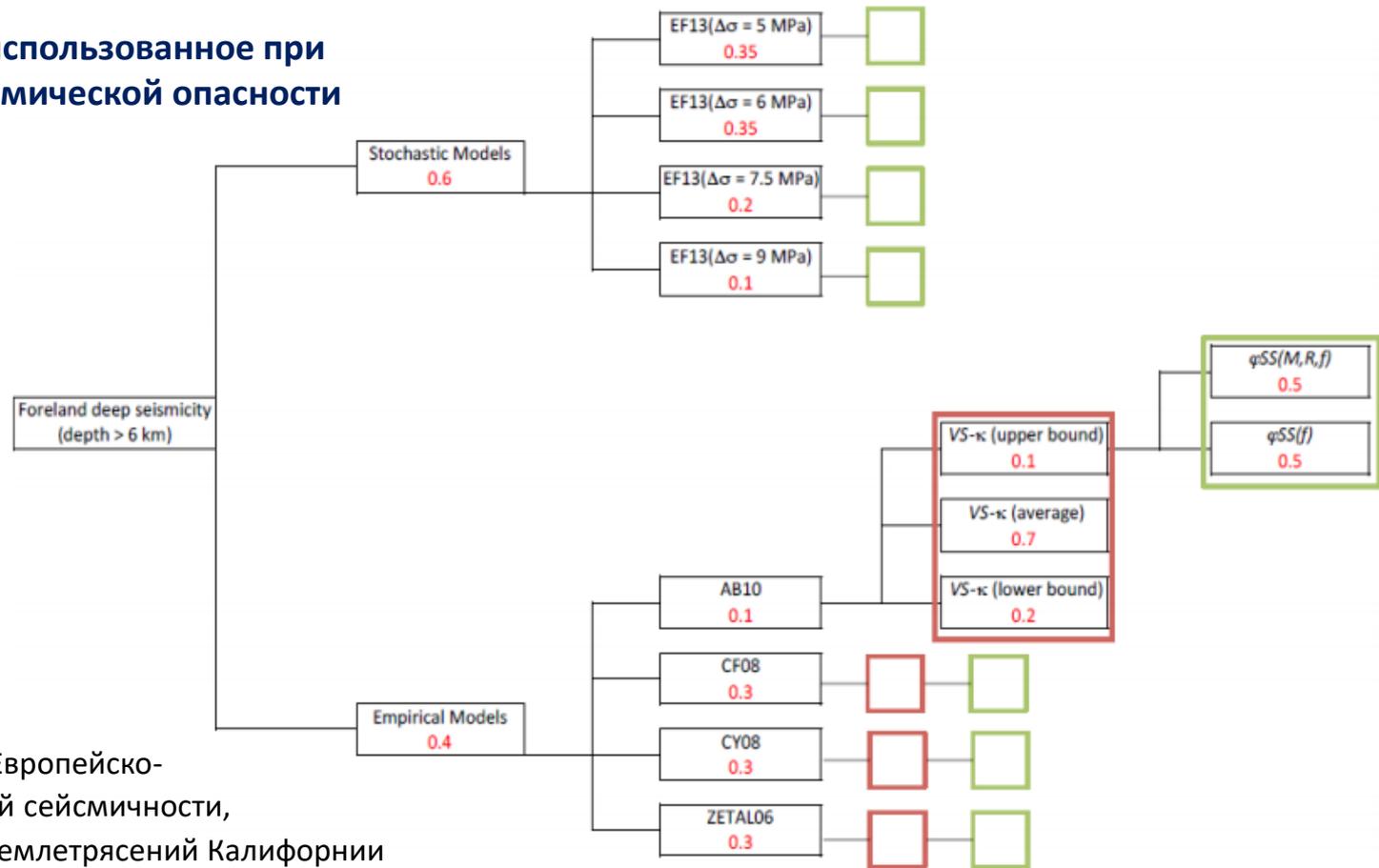
T	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
PGV	4.336809	0.744910	-0.130586	-1.126551	0.175383	-0.003416
PGA	0.416172	0.322472	-0.109281	-1.293378	0.155847	-0.004688
0.02	0.415749	0.321493	-0.109762	-1.293516	0.155764	-0.004679
0.03	0.801687	0.305289	-0.098167	-1.362806	0.160141	-0.004883
0.05	1.272166	0.359747	-0.091202	-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



Для учета неопределенностей в оценках сейсмической опасности **5 УПДГ** из других регионов – рекомендации **GEM** (с соответствующими весами) добавлены в логическое дерево:

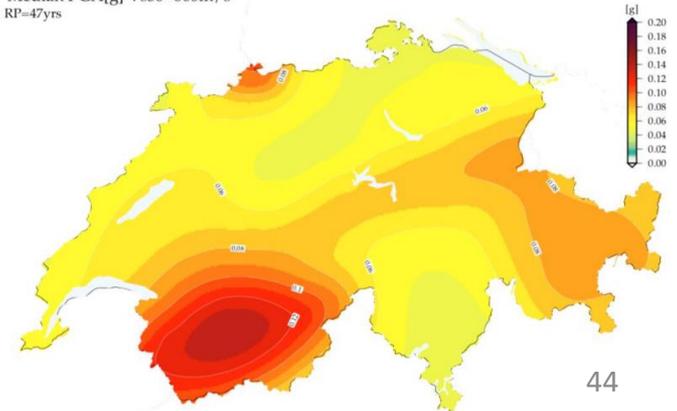
- Глобальная модель коровой сейсмичности (**BSSA14** – **Boore et al., 2014**),
- 2 модели, разработанные для Швейцарских и Французских Альп (**DC15** – **Drouet & Cotton, 2015**; **CEA15** – **Cauzzi et al., 2015**) и
- 2 модели стабильной континентальной сейсмичности (**AB06** – **Atkinson & Boore, 2006**; **RSE13** – **Rietbrock et al., 2013**)

Логическое дерево, использованное при построении карт сейсмической опасности Швейцарии



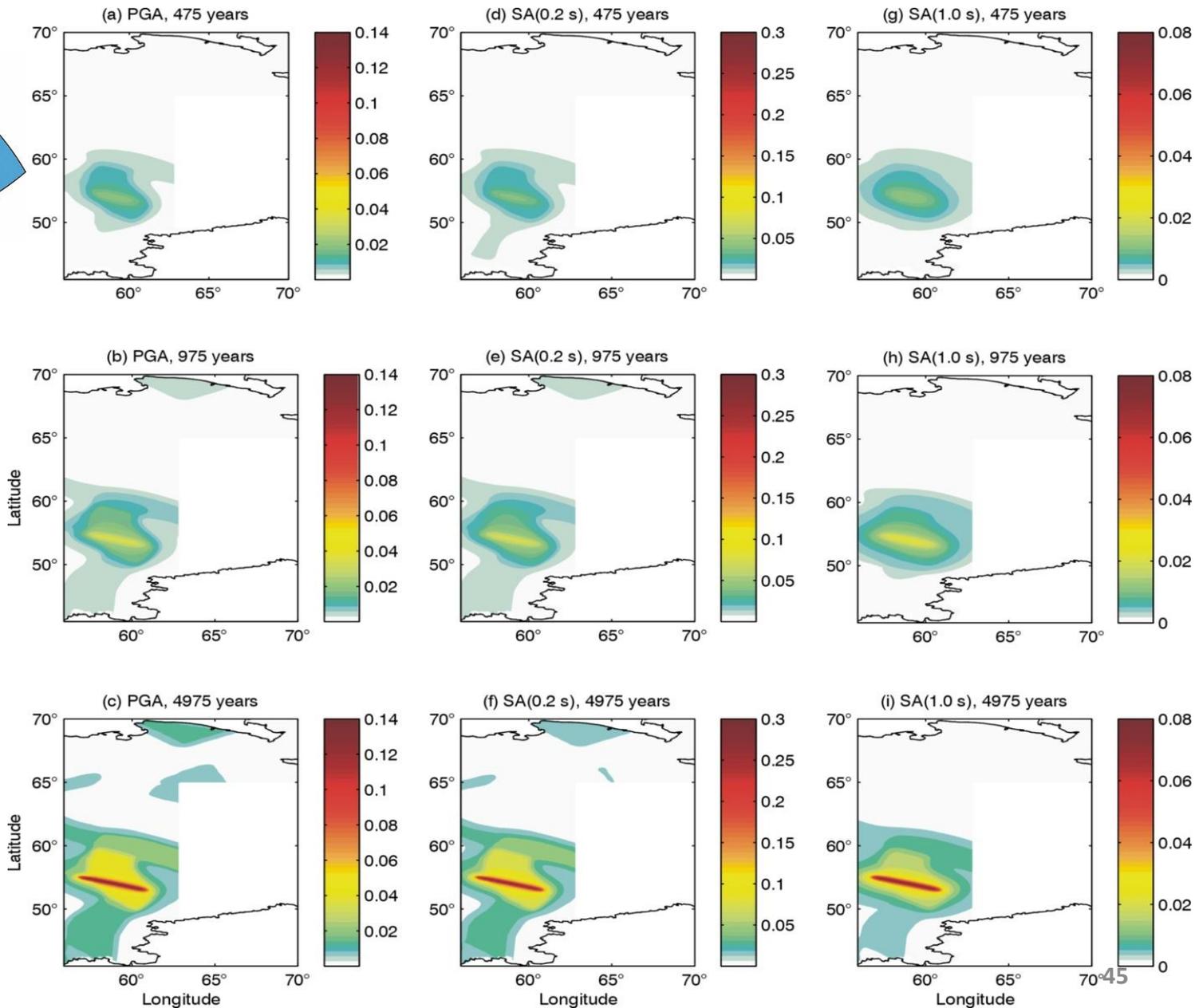
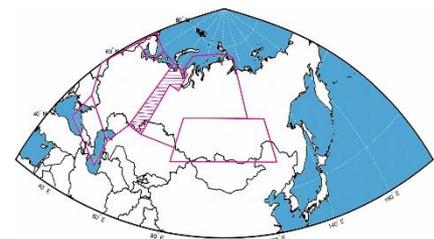
- AB10** – УПДГ по данным Европейско-средиземноморской сейсмичности,
- CY08** – УПДГ по данным землетрясений Калифорнии средних магнитуд, подходящее для Европы,
- CF08** – УПДГ на основе мировых данных с преобладанием японских и итальянских данных,
- ZETAL06** – УПДГ на основе японских данных

Median PGA[g] Vs30=800m/s
RP=47yrs

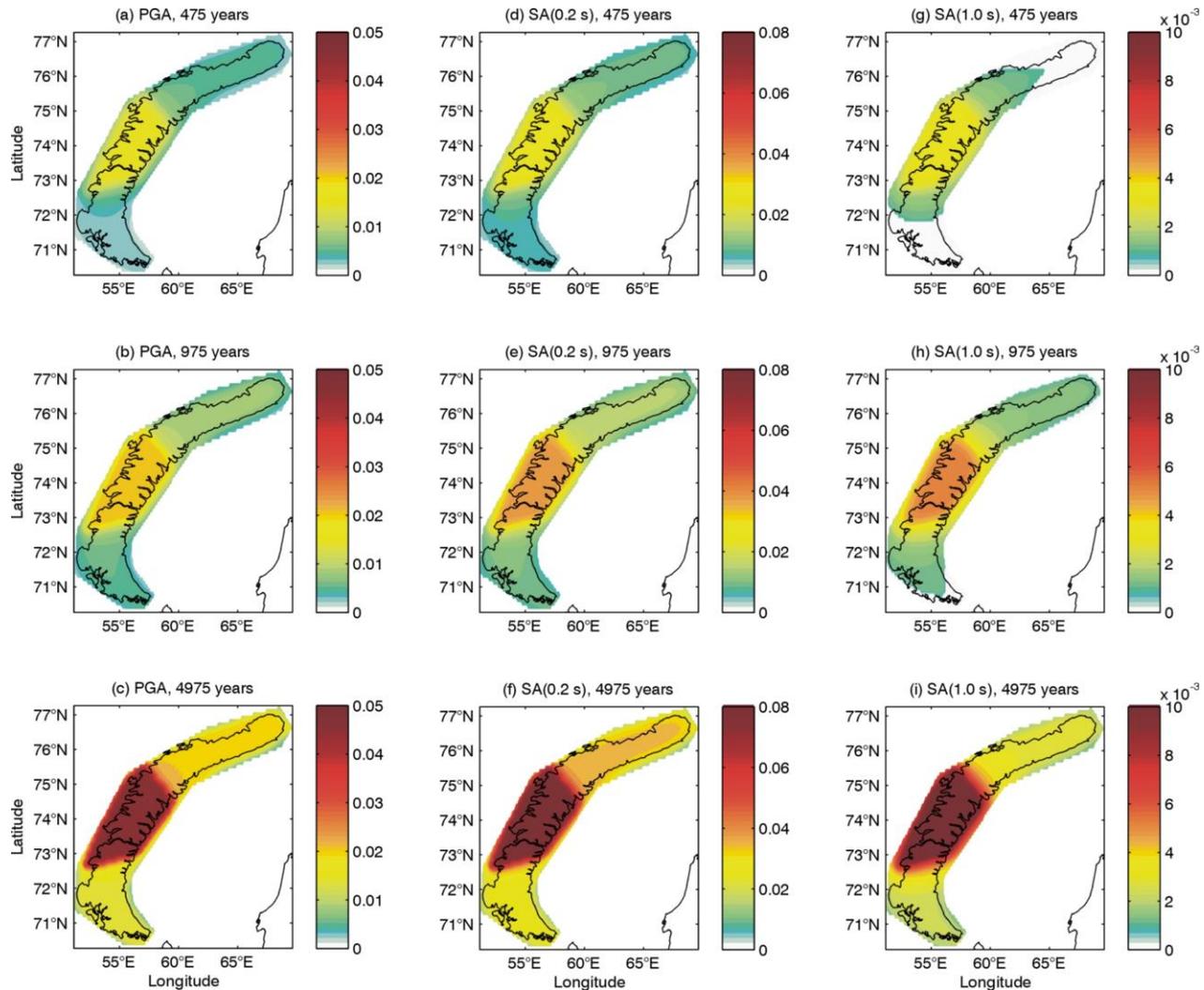
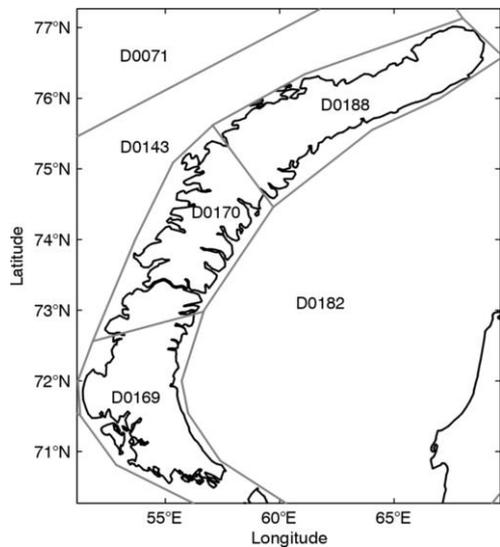


Карта PGA Швейцарии для периода повторяемости 475 лет и грунтов с $V_{s30} \sim 800$ м/с

Карты PGA и SA (0.2 с и 1.0 с) для Урала – региона переходной сейсмичности



Сейсмогенные структуры и карты PGA и SA (0.2 с и 1.0 с) для островов Новая Земля – региона переходной сейсмичности





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