

# Оценка сейсмической опасности зарубежных объектов ядерной энергетики: Принципы, примеры, проблемы



**ИФЗ РАН**

# Опыт оценки сейсмической опасности

АЭС Аккую	Турция	2011 - 2015
АЭС Руппур	Бангладеш	2014 - продолжается
АЭС Пакш (блоки 5 и 6)	Венгрия	2014 - продолжается
АЭС Бушер-2	Иран	2015 - 2017
НИЯЦ Эль-Альто	Боливия	2017
АЭС Курская-2	Россия	2012 - 2015
АЭС Смоленская-2		2014 - 2016
МГ Сила Сибири	Россия	2011 - 2014
МГ Южный поток	Сербия	2014
МГ Краснодарский край - Крым	Россия	2015

# Предварительные замечания

**Рекомендации МАГАТЭ обобщают мировой опыт, накопленный в разнообразных сеймотектонических условиях**

- Сейсмическая опасность – расчетные воздействия с заданной годовой частотой превышения
- Конкретное значение вероятности не оговаривается. Выделяются два уровня: редкие сильные и умеренные частые события
- В России принято  $10^{-3}$  (уровень ПЗ) и  $10^{-4}$  (уровень МРЗ). В Венгрии МРЗ  $10^{-5}$ , ПЗ – 1/3 от МРЗ

**IAEA Safety Standards**

for protecting people and the environment

Seismic Hazards  
in Site Evaluation  
for Nuclear Installations

Specific Safety Guide

No. SSG-9



**IAEA**

International Atomic Energy Agency

# Зачем это надо?

**Анализ сейсмической опасности (SHA) нужен для:**

- 1) лицензирования площадки (разрешение на размещение объекта);**
- 2) получения исходных данных для проектирования (PGA, спектр реакции);**
- 3) вероятностного анализа безопасности**

**- Для целей лицензирования требуется высокий уровень консерватизма;**

**- Для проектирования требуется реалистичный расчет воздействий;**

**- Для анализа безопасности оперируют чрезвычайно малыми вероятностями (порядка  $10^{-8}$ ). В результате можно получить физически совершенно абсурдные воздействия (около 20g)**

# Технология

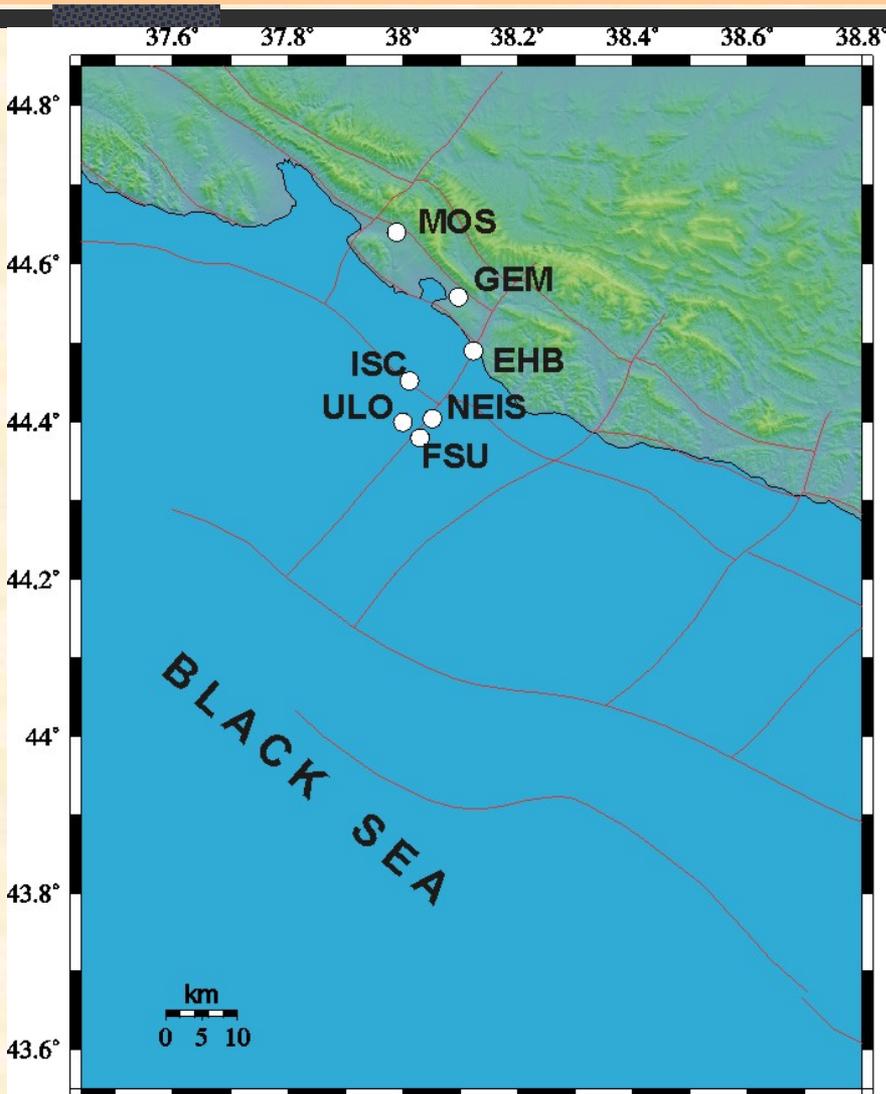
- **Вероятностный анализ сейсмической опасности (PSHA) – достаточно разработанная технология**
- **Проблема PSHA лежит не столько в области дальнейшего развития технологии, сколько в сборе исходных данных и адекватном анализе их качества (точность, полнота, достоверность)**
- **Результат будет получен для любых входных данных**

# Исходные данные и Модель

*«Я взял опубликованный каталог и разработал модель для оценки максимальной ожидаемой магнитуды. Я не обязан разбираться в том, хорош каталог или плох»*

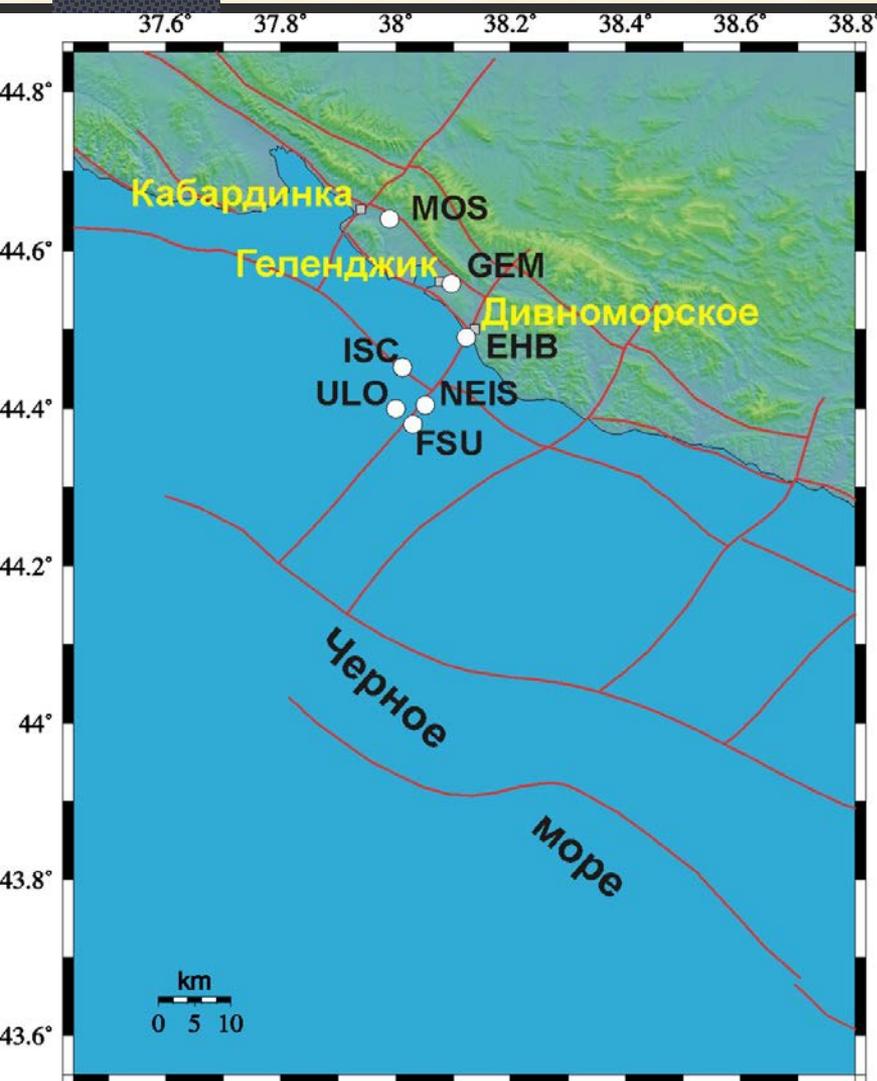
**Но дальнейшие модельные построения неверны, если в каталоге землетрясений есть грубые ошибки**

# Землетрясение 1978 на Кавказе, Mw=5.7



Положение эпицентров по данным различных каталогов находятся в хорошем согласии; они также не противоречат карте разломов. Но решение явно ошибочно

# Землетрясение 1978 на Кавказе, Mw=5.7



Каталог	Пункт	$\Delta$ , km	I, MSK64
MOS	Кабардинка	2.8	10
FSU	Джанхот	14	7 – 8
NEIS	Джанхот	11	8
ULO	Джанхот	14	7 – 8
ISC	Дивноморское	11	8
EHB	Дивноморское	1.4	11
GEM	Геленджик	0.8	11 – 12

**Землетрясение не вызвало повреждений**

# Локальные сети: АЭС Руппур (Бангладеш)

Сеть требует постоянных усилий по поддержанию работоспособности

Установка более мощных батарей



Радикальное решение проблемы тени



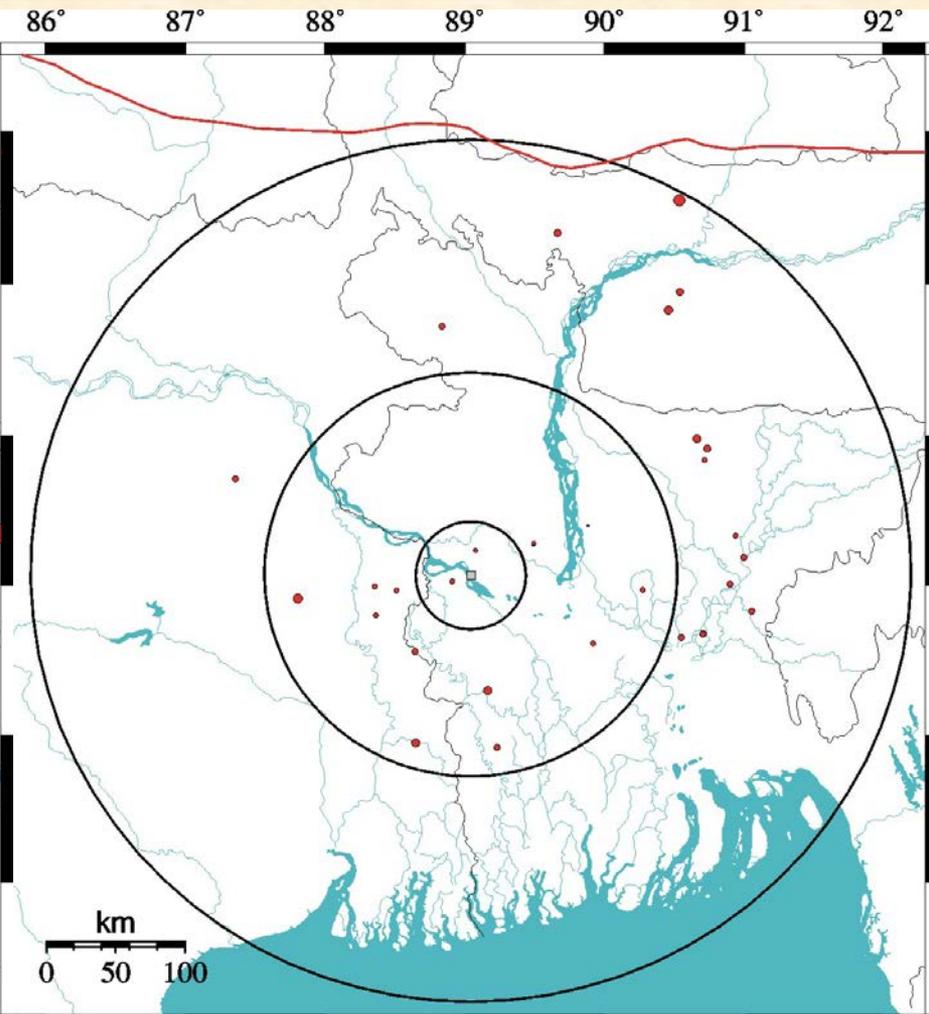
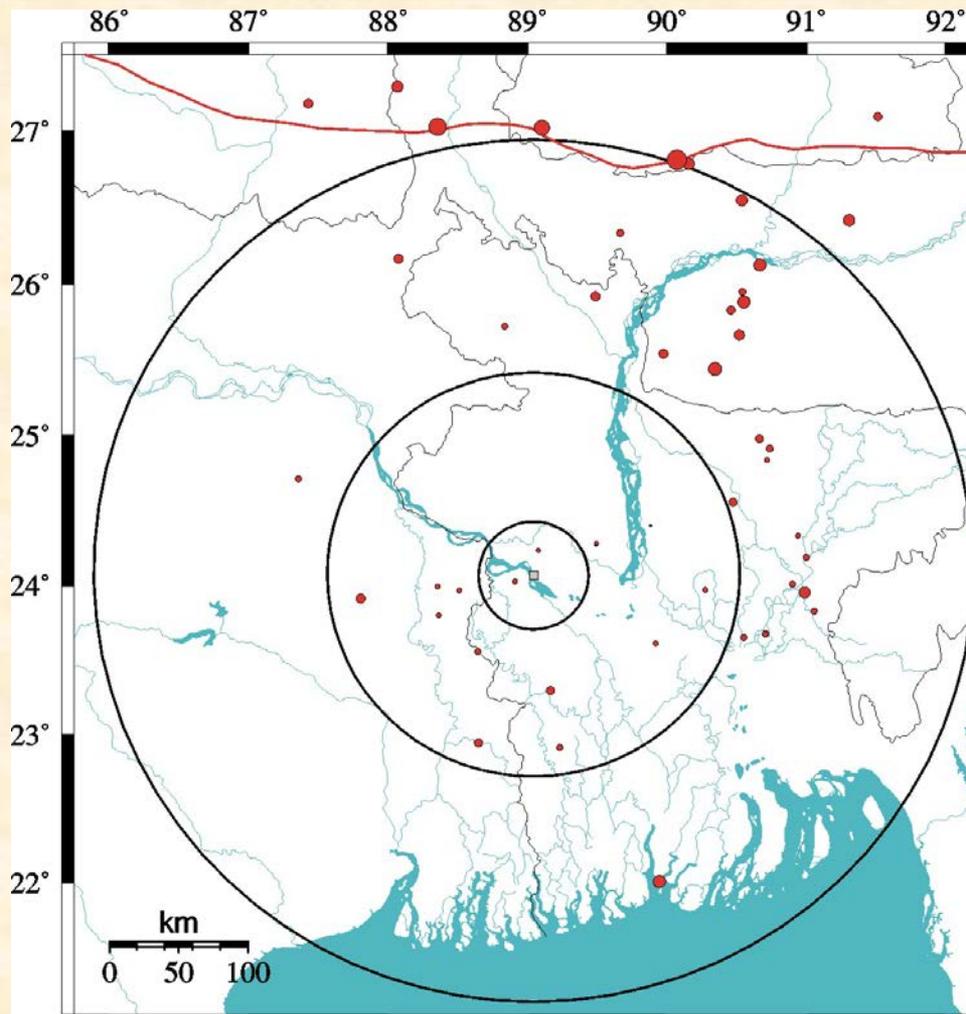
Разрушительное действие влажности на солнечную панель (блок контроллера)



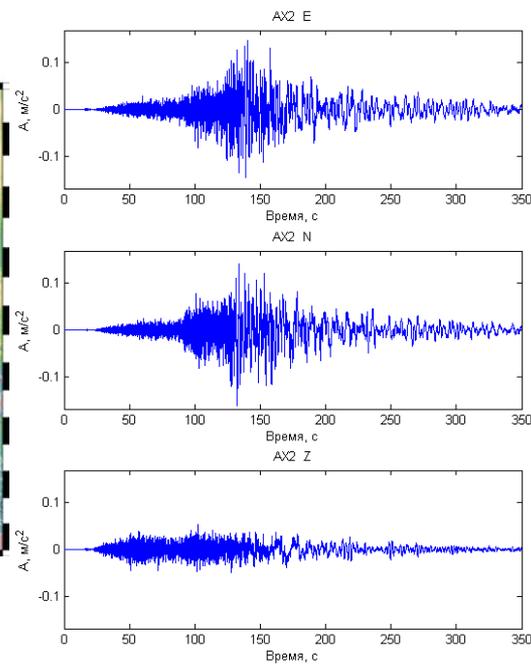
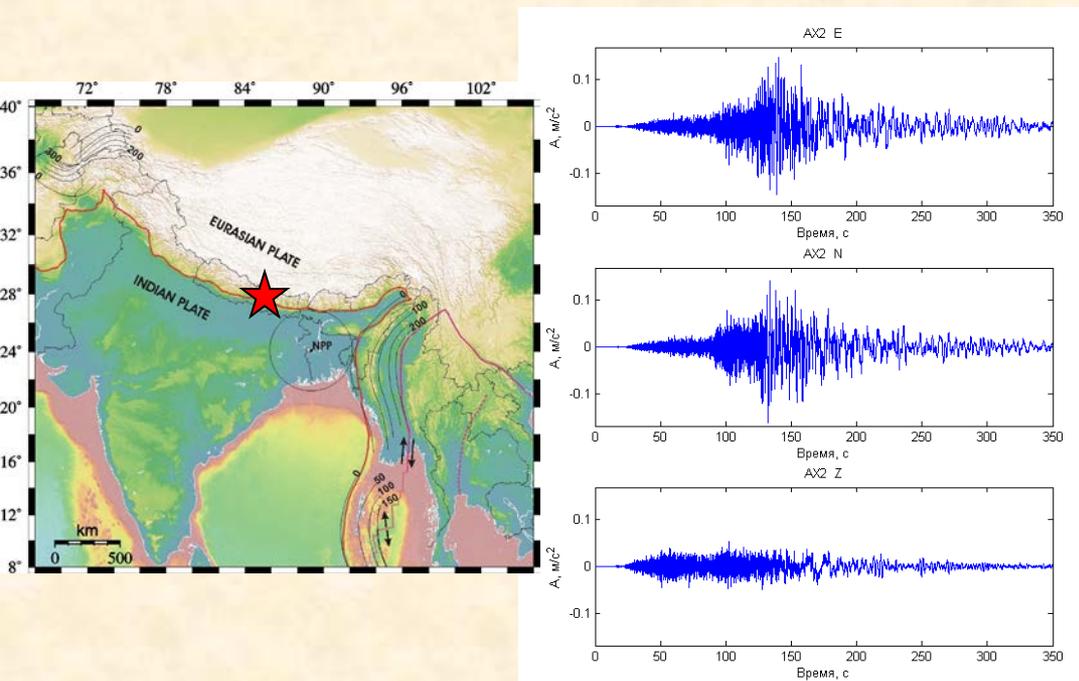
# Локальные сети: АЭС Руппур (Бангладеш)

Каталог локальной сети

События только в локальном каталоге



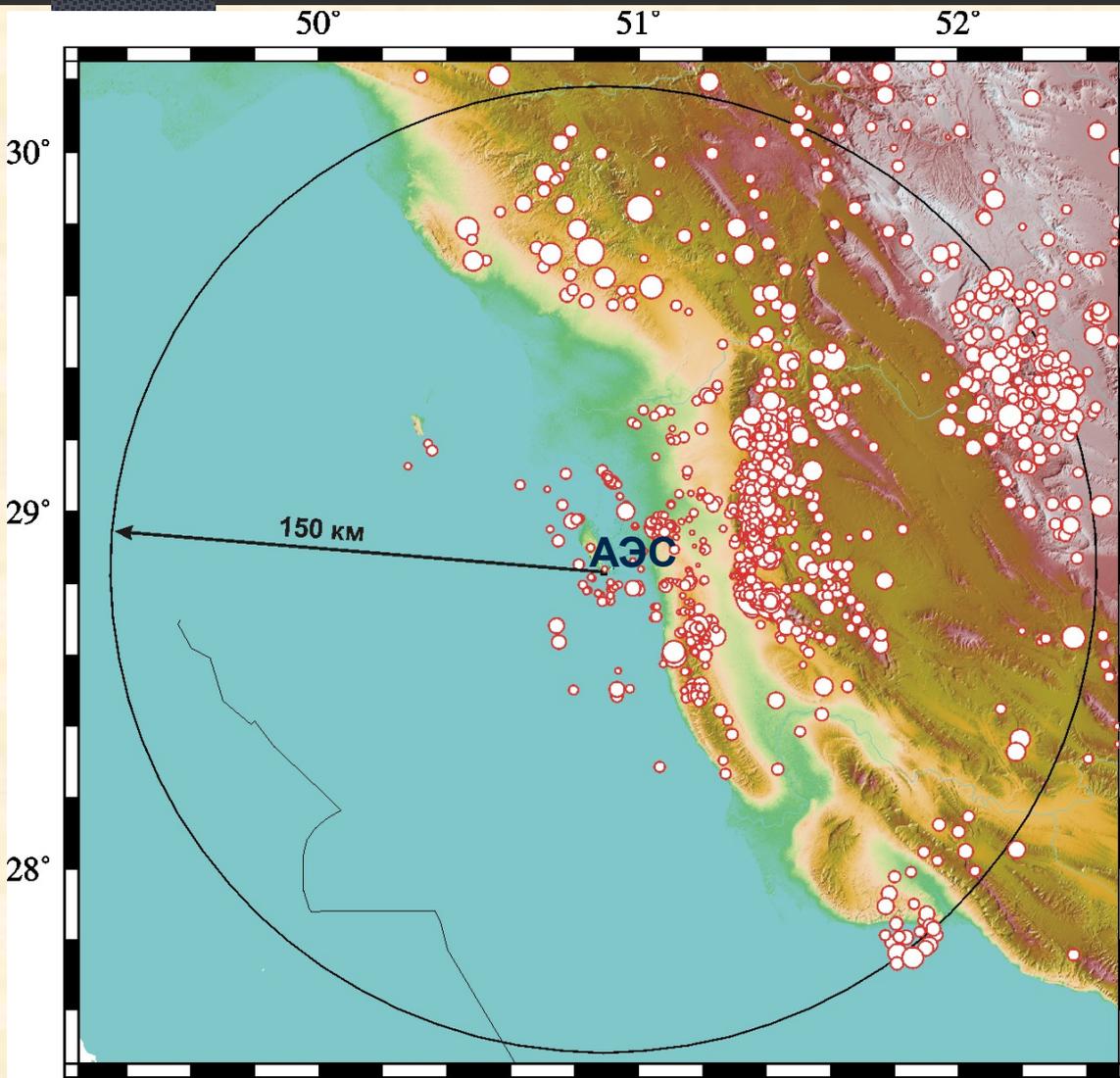
# Локальные сети: АЭС Руппур (Бангладеш)



Акселерограмма Непальского землетрясения  
( $M_w=7.8$ ) 2015 г. на площадке АЭС



# Локальные сети: АЭС Бушер (Иран)



С февраля 1999 по июнь 2001 г. локальной сетью Бушер-1 записано 4275 землетрясений.

Спустя 15 лет этот каталог использовался для оценки сейсмической опасности Бушер-2

# Альтернативные интерпретации

Из протокола совещания международной группы экспертов по согласованию параметров логического дерева для расчета сейсмической опасности (выбор в пользу формальной оценки)

## 5) Determination of $M_{max}$

- a. It is agreed to use two different methods of calculation
    - i. Wells and Coppersmith (1994)
    - ii. maximum observed seismicity plus a number
  - b. Regarding segmentation of important faults (Mand and Borazjan):
    - i. The Mand fault is divided into two segments (Northern part and Southern part)
    - ii. The Borazjan1 fault is considered as a single fault as shown in the in the appendix.
1. Total length of the fault length on the map (0.325)
  2. 0.75 length of the fault length on the map (0.53)
  3. 0.50 length of the fault length on the map (0.145)

Корреляционные соотношения связывают длину разрыва на поверхности с магнитудой, которую она может генерировать

Но какая часть разлома может вспороться в одном акте, решается экспертно

Использование формальной процедуры фактически только относит экспертное решение на другой этап

# Воздействия: уравнения ожидаемого движения грунта (GMPE)

СВ, 2015

$$\ln Y = \begin{cases} \ln \text{PGA}; & Y < \text{PGA}, T < 0.25 \\ f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atm}; & \text{Otherwise} \end{cases}$$

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 M; & M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5); & 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5) + c_3 (M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2 (M - 4.5) + c_3 (M - 5.5) + c_4 (M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{dis} = (c_5 + c_6 M) \ln \left( \sqrt{R_{RUP}^2 + c_7^2} \right)$$

$$f_{flt} = f_{flt,F} f_{flt,M}$$

$$f_{flt,F} = c_8 F_{RV} + c_9 F_{NM}$$

$$f_{flt,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 4.5 \\ M - 4.5; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1; & M > 5.5 \end{cases}$$

$$f_{hng} = c_{10} f_{hng,R_X} f_{hng,R_{RUP}} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta}$$

$$f_{hng,R_X} = \begin{cases} 0; & R_X < 0 \\ f_1(R_X); & 0 \leq R_X < R_1 \\ \max[f_2(R_X), 0]; & R_X \geq R_1 \end{cases}$$

$$f_1(R_X) = h_1 + h_2 (R_X / R_1) + h_3 (R_X / R_1)^2$$

$$f_2(R_X) = h_4 + h_5 \left( \frac{R_X - R_1}{R_2 - R_1} \right) + h_6 \left( \frac{R_X - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2$$

$$R_1 = W \cos(\delta)$$

$$f_{hng,R_{RUP}} = \begin{cases} 1; & R_{RUP} = 0 \\ (R_{RUP} - R_{JB}) / R_{RUP}; & R_{RUP} > 0 \end{cases}$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 5.5 \\ (M - 5.5)[1 + a_2(M - 6.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ 1 + a_2(M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 1 - 0.06 Z_{TOR}; & Z_{TOR} \leq 16.66 \\ 0; & Z_{TOR} > 16.66 \end{cases}$$

$$f_{hng,\delta} = (90 - \delta) / 45$$

$$f_{site} = f_{site,G} + S_J f_{site,J}$$

$$f_{site,G} = \begin{cases} c_{11} \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right) + k_2 \left\{ \ln \left[ A_{1100} + c \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right] - \ln [A_{1100} + c] \right\}; & V_{S30} \leq k_1 \\ (c_{11} + k_2 n) \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right); & V_{S30} > k_1 \end{cases}$$

$$f_{site,J} = \begin{cases} (c_{12} + k_2 n) \left[ \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right) - \ln \left( \frac{200}{k_1} \right) \right]; & V_{S30} \leq 200 \\ (c_{13} + k_2 n) \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right); & \text{All } V_{S30} \end{cases}$$

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} f_{hyp,M}$$

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{HYP} \leq 7 \\ Z_{HYP} - 7; & 7 < Z_{HYP} \leq 20 \\ 13; & Z_{HYP} > 20 \end{cases}$$

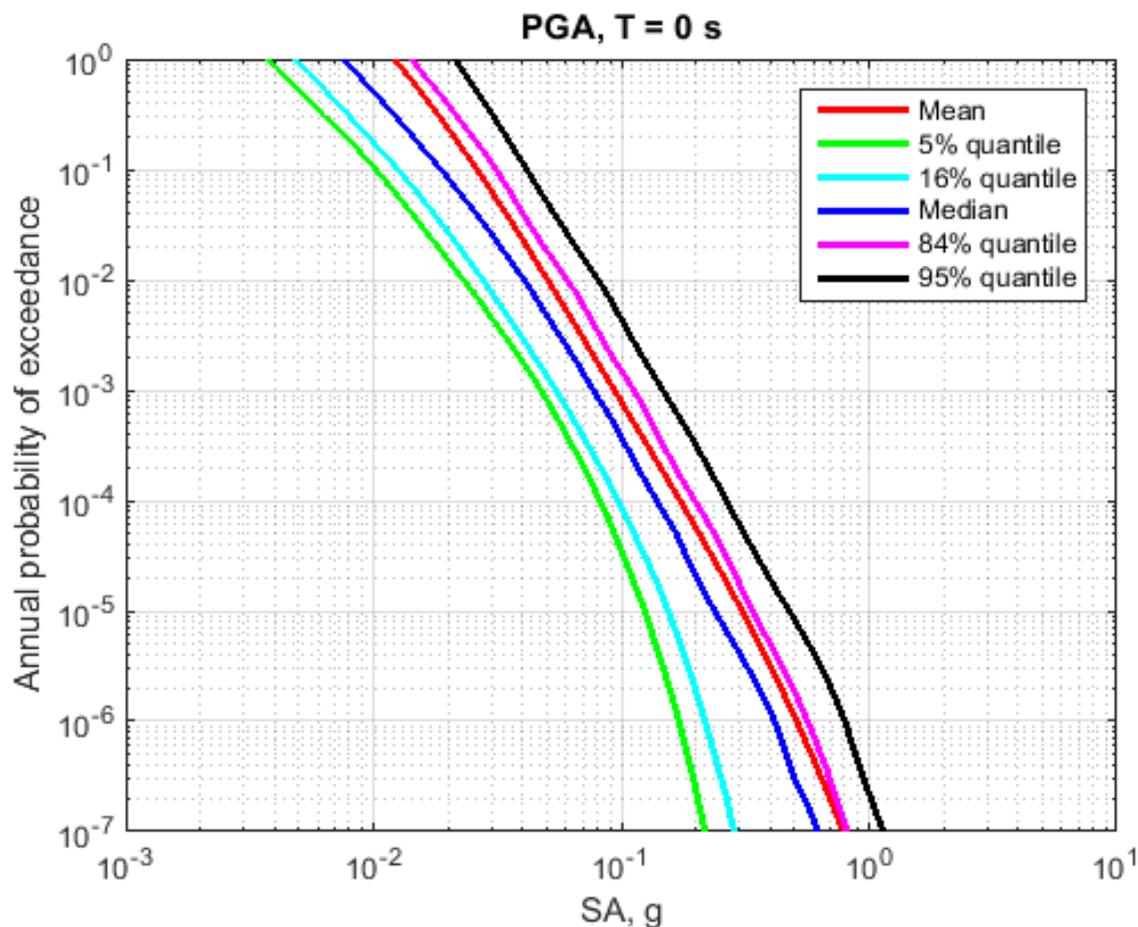
$$f_{hyp,M} = \begin{cases} c_{17}; & M \leq 5.5 \\ [c_{17} + (c_{18} - c_{17})(M - 5.5)]; & 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18}; & M > 6.5 \end{cases}$$

$$f_{sed} = \begin{cases} (c_{14} + c_{15} S_J)(Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} \leq 1 \\ 0; & 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16} k_3 e^{-0.75} [1 - \exp(-0.25(Z_{2.5} - 3))]; & Z_{2.5} > 3 \end{cases}$$

$$f_{dip} = \begin{cases} c_{19} \delta; & M \leq 4.5 \\ c_{19} (5.5 - M) \delta; & 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0; & M > 5.5 \end{cases}$$

$$f_{atm} = \begin{cases} (c_{20} + \Delta c_{20})(R_{RUP} - 80); & R_{RUP} > 80 \\ 0; & R_{RUP} \leq 80 \end{cases}$$

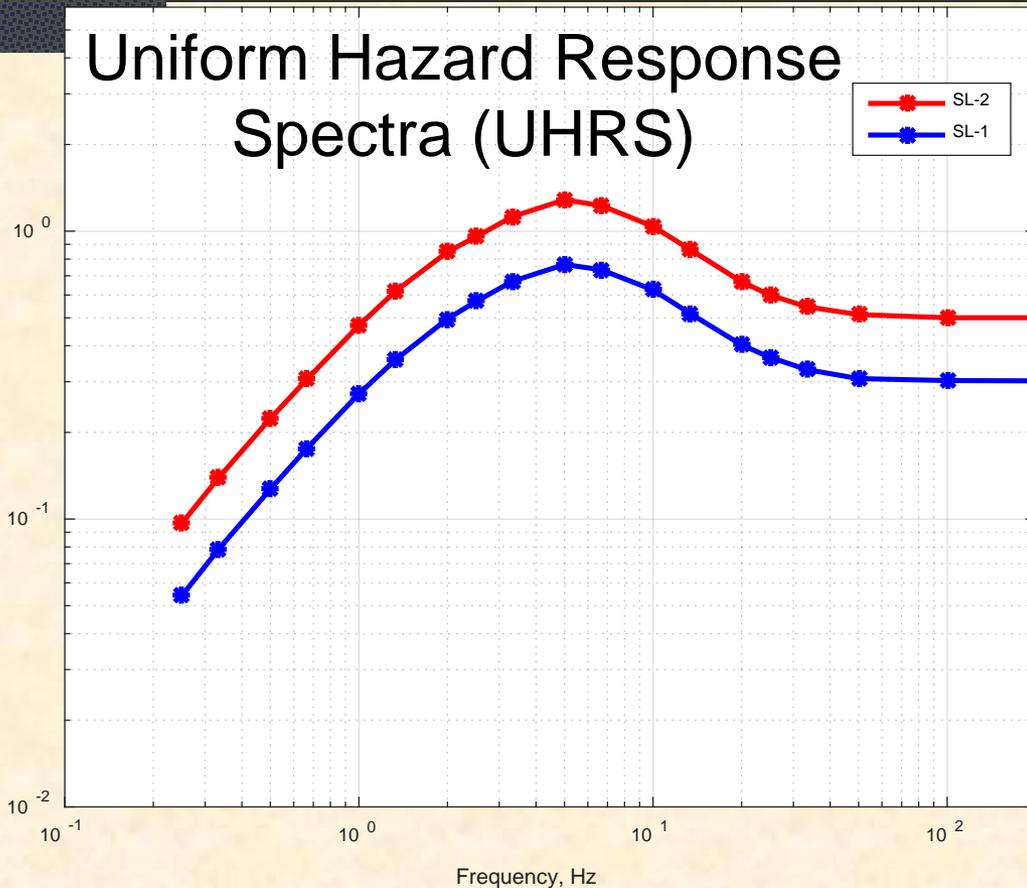
# Воздействия: кривые опасности АЭС Руппур (Бангладеш)



Кривая опасности по ветвям логического дерева для пикового ускорения движения грунта. Аналогичные расчеты проводятся для 19 периодов

# Воздействия: спектр реакции АЭС Бушер (Иран)

Uniform Hazard Response  
Spectra (UHRs)



Спектр реакции (5% затухание)  
без учета отклика грунтовой  
толщи на площадке (относится к  
условно скальному основанию)

В соответствии со спектром  
генерируется набор  
синтетических акселерограмм

Спектр модифицируется с  
учетом отклика грунтовой  
толщи на площадке

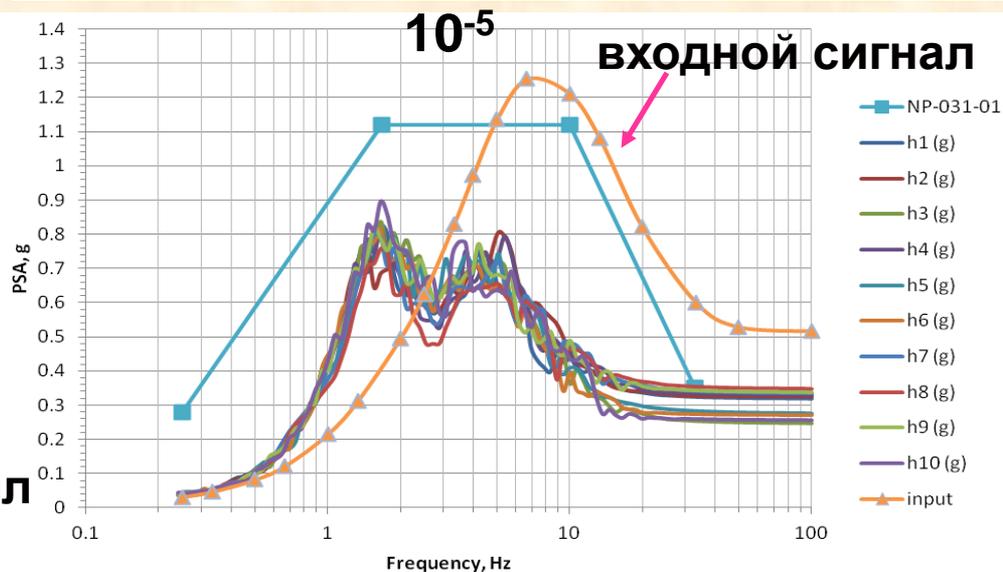
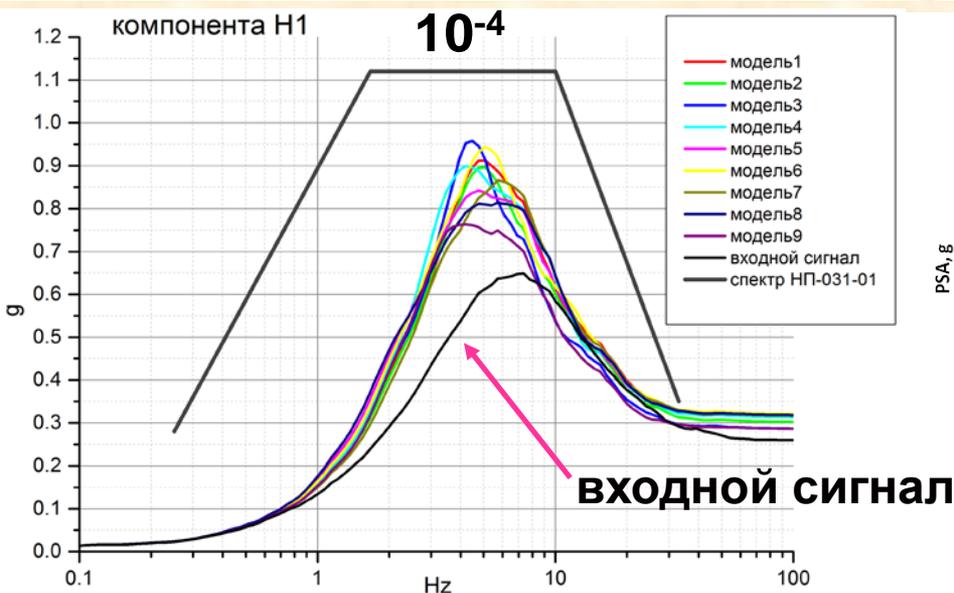
GMPE составляются для отдельных периодов: 0 с (PGA), 0.01, 0.02,  
0.03, 0.04, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, 4

# Реакция площадки: АЭС Пакш (Венгрия)

Входное воздействие на условно скальном основании (глубина 120 м,  $V_{s30}=700$  м/с) корректируется за счет реакции площадки

Небольшой уровень входного сигнала (**0.26g**) – линейное поведение (0.29 - 0.32g для разных грунтовых моделей)

Высокий уровень входного сигнала (**0.51g**) – нелинейное поведение: эквивалентное линейное моделирование (**0.34g**)



Амплитуда увеличивается;  
Спектр становится уже;  
Смещается в сторону низких частот

Амплитуда уменьшается;  
Спектр становится шире;  
Смещается в сторону низких частот

# Выводы

- 1. Невозможно одновременно реализовать принцип максимального консерватизма и реалистичной оценки. Приоритетом является удовлетворение требований проектировщика**
- 2. Естественный инструмент учета различных мнений (моделей) – логическое дерево. Оно должно адекватно отражать неопределенность моделей. Построение логического дерева, как правило, реализуется на экспертном совете**
- 3. Применение формальных (объективных) методов часто лишь маскирует экспертные оценки, передвигая их на другие этапы работы**
- 4. Несмотря на несовершенство современной международной практики оценки сейсмической опасности, пока другой альтернативы ей нет**