

**ПОЛУЧЕНИЕ ДОЛГОСРОЧНЫХ  
ОЦЕНОК СЕЙСМО-  
И ЦУНАМИОПАСНОСТИ: ПРОБЛЕМЫ  
МЕТОДОЛОГИ И ИСХОДНЫХ  
ДАННЫХ**

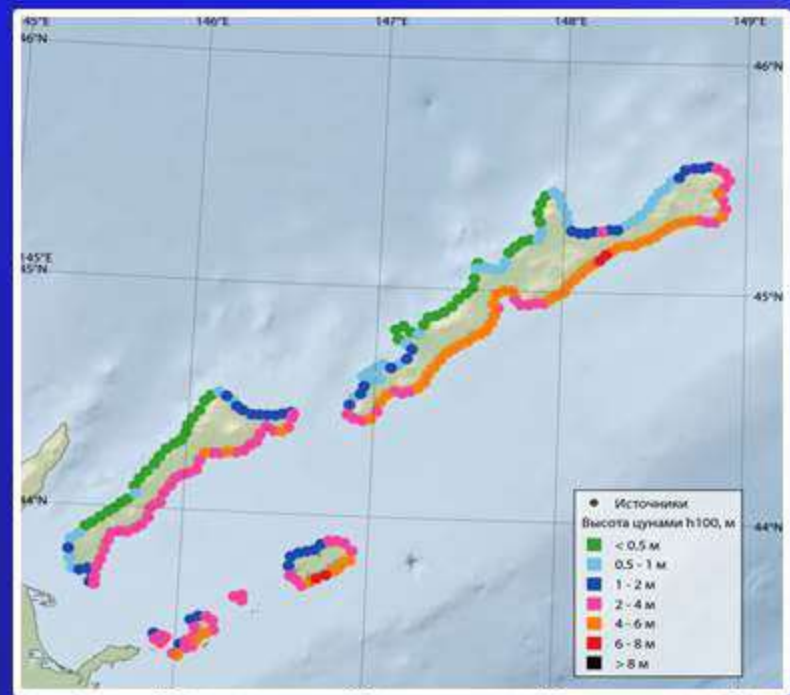
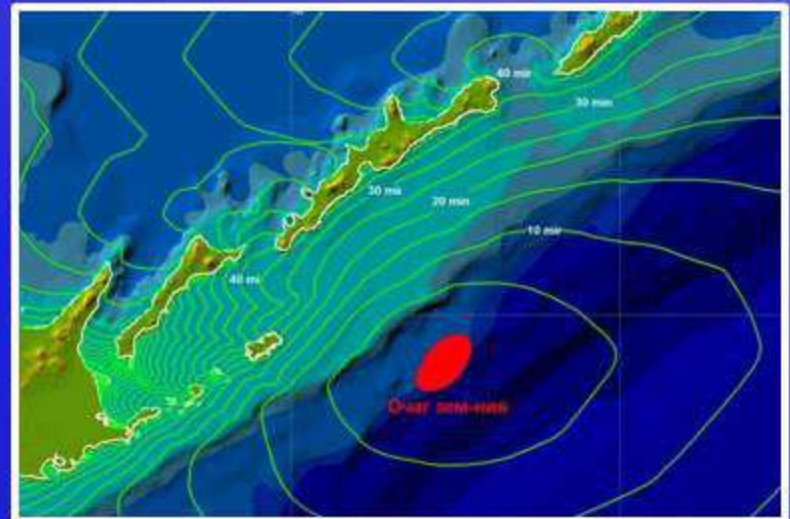
**В.К.Гусяков**

**Доктор физ-мат. наук, зав.лабораторией цунами  
Институт вычислительной математики и  
математической геофизики  
Новосибирск**

# Две основные научно-прикладные задачи в проблеме цунами

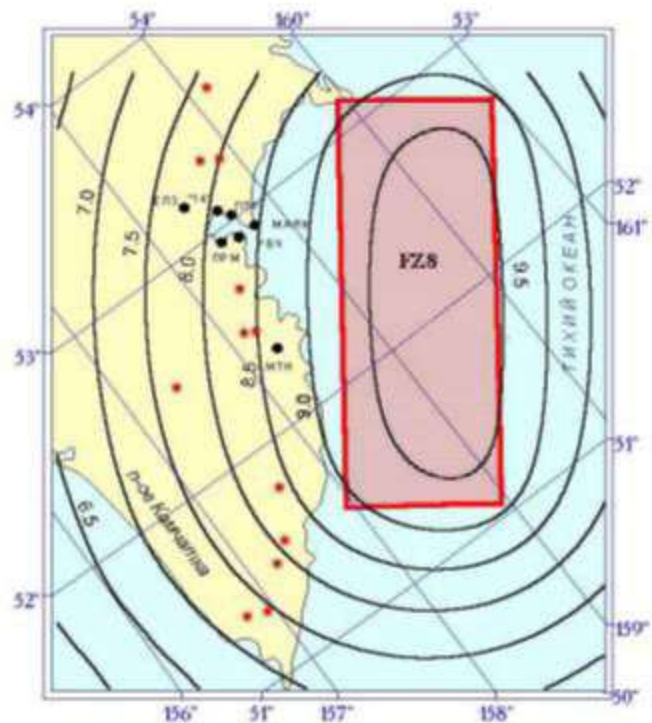
(1) Обеспечение оперативного предупреждения населения об уже возникшем в океане цунами (на основе сейсмического или гидрофизического прогноза)

(2) Оценка долгосрочной цунамиопасности (предварительное цунамирайонирование побережья)



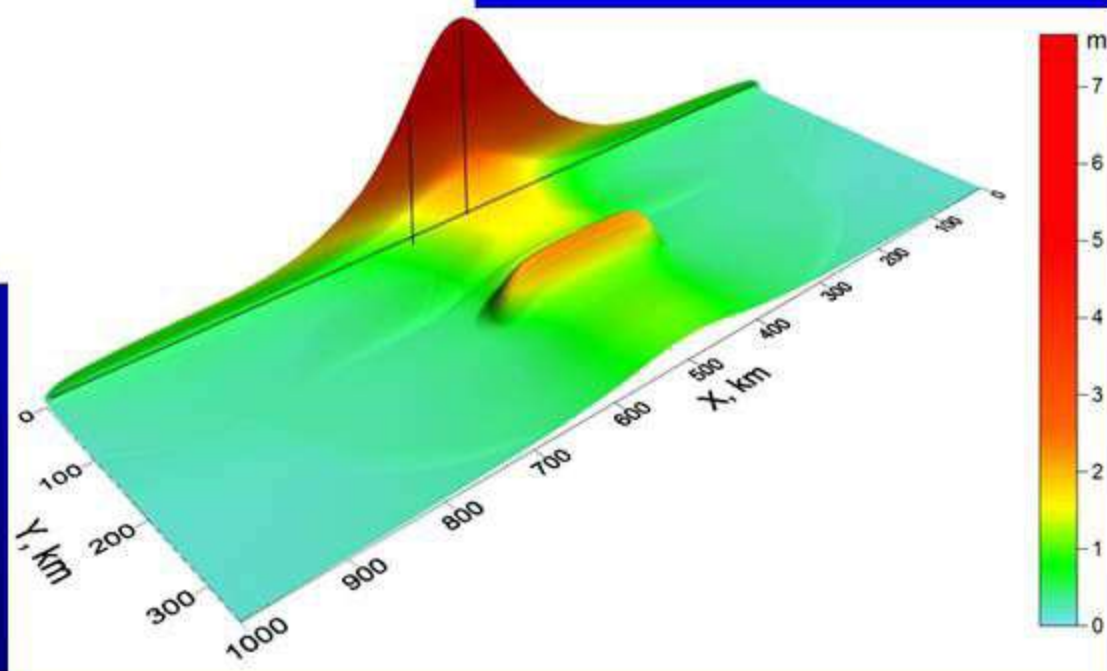
## Два главных аспекта сегодняшнего доклада

- 1) Задачи сейсмо- и цунамирайонирования: общность и различия в методологии и исходных данных
- 2) Проблема сильнейшего события в оценке сейсмо- и цунамиопасности

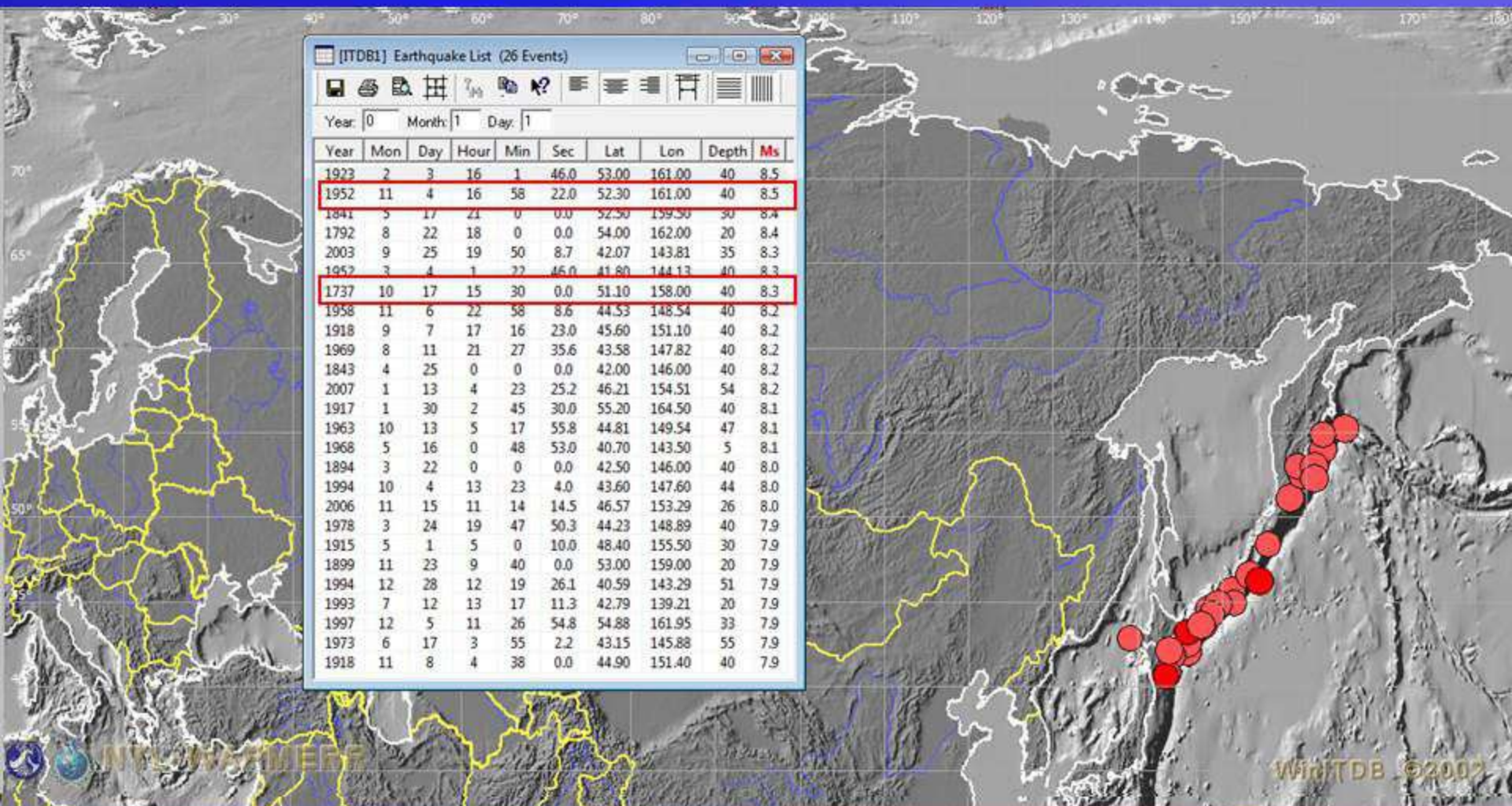


- Проекция очага FZS на поверхность Земли
- Изосейсы землетрясения FZS
- Путисты расчета
- Вулканы

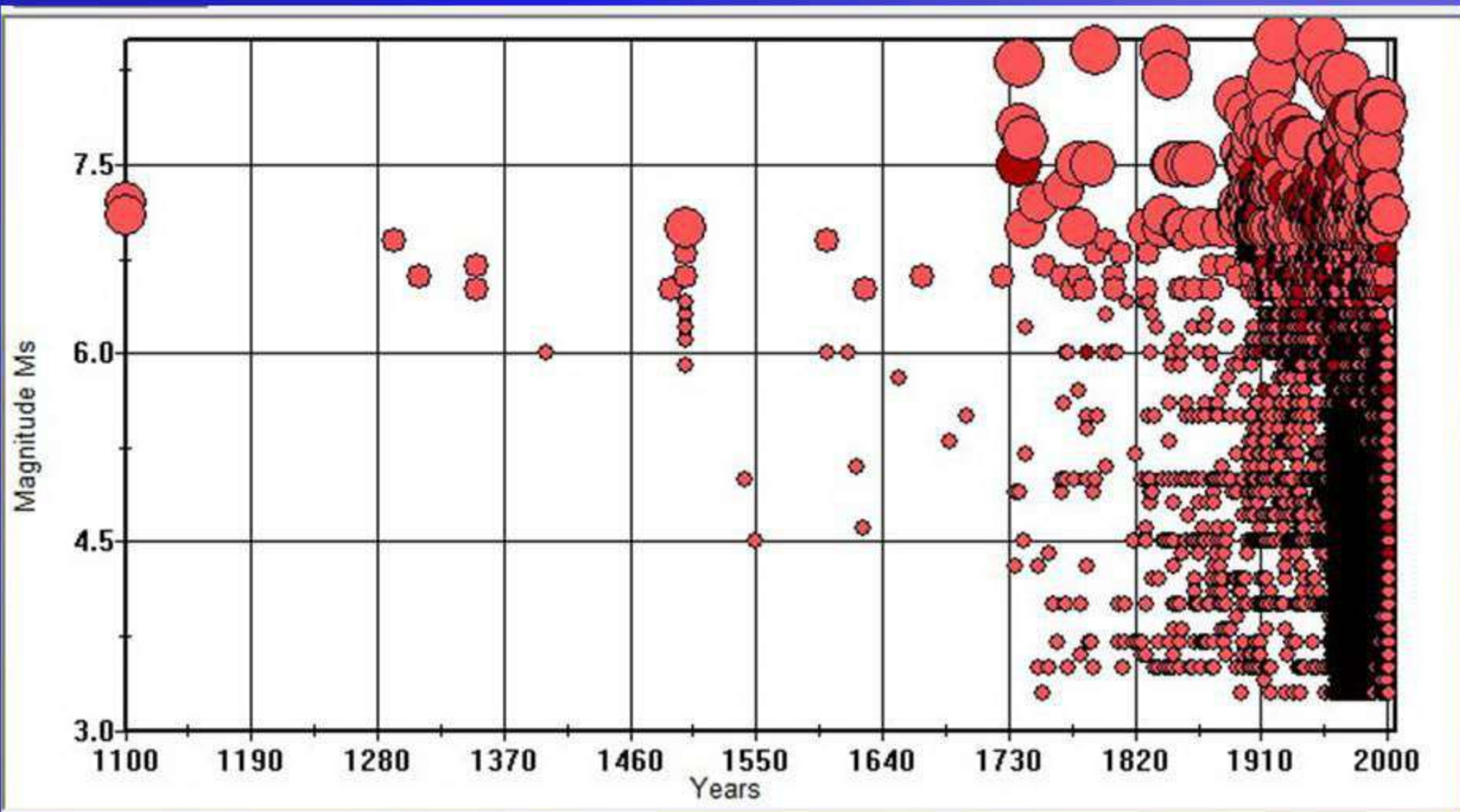
Пример расчета изосейст для модельного очага  $M_w=8.4$  вблизи Камчатки (Гусев, 2013)



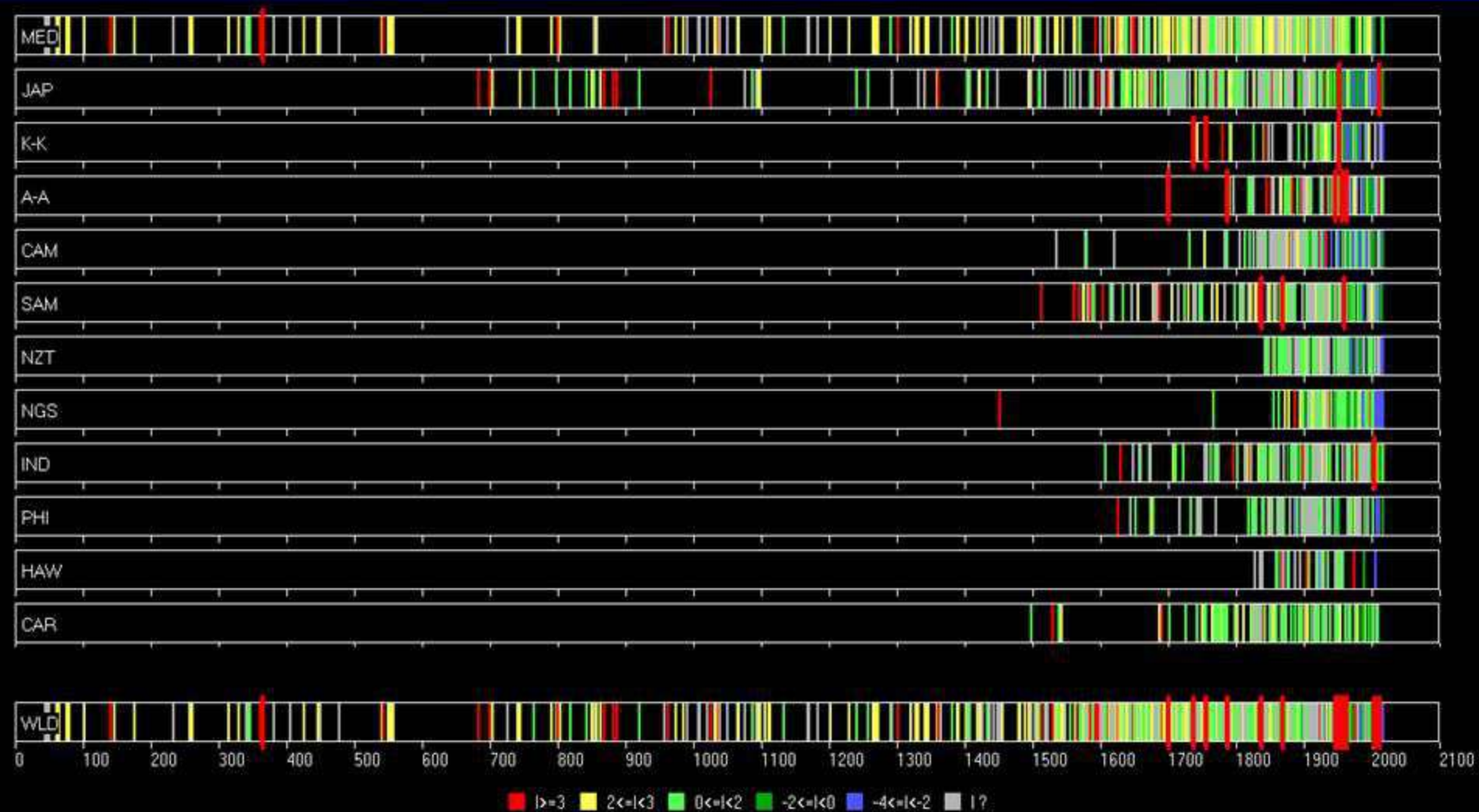
Пример расчета высот цунами для модельного очага  $M_w=8.4$  вблизи Камчатки (Бейзель, Гусяков, Чубаров, 2008)



Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии (Уломов, Медведева, 2013) покрывает весь исторический период (от 7 тыс. лет до н.э. по настоящее время) и содержит около 18 тыс событий (на современной территории РФ)



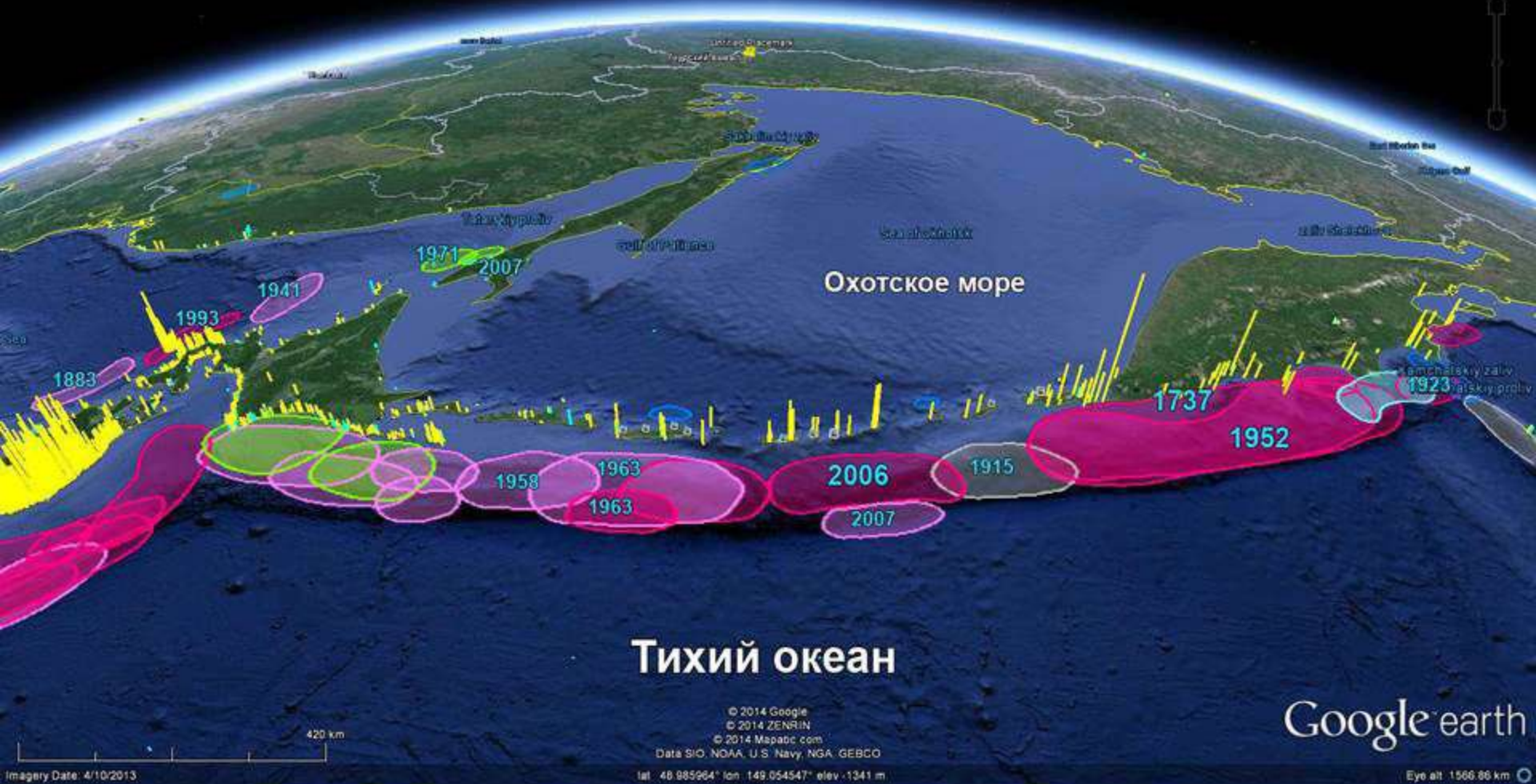
Временная развертка событий Специализированного каталога землетрясений  
Северной Евразии (Уломов, Медведева, 2013) за последнюю 1000 лет



**Сравнительная длина некоторых региональных каталогов цунами (средняя длина равна 424 года).  
 Вертикальные линии соответствуют отдельным цунами и событиям. Цветом показана  
 интенсивность цунами по шкале Соловьёва-Имамуры.**

# 105 цунами (1737-2017)

Последние документированные жертвы от цунами на побережье России были в 1952г.



Карта очагов и высот сильнейших исторических цунами Курило-Камчатского региона  
**105** цунамигенных событий за период с 1737 года по настоящее время



# 50 цунамигенных событий на интервале 2500 лет



Положение известных на данный момент очагов цунами в Черном и Азовском морях. Вертикальные линии показывают известные максимальные высоты волн.

## Цунами и цунами-подобные явления в других морях, омывающих побережье России

	Интервал наблюд.	Макс. магн.	Макс. высота
<b>Черное море</b>			
<b>50</b> событий	-900 – 2014гг.	$M_{max} = 8.1$	$H_{max} = 7-8$ м
<b>Каспийское море</b>			
<b>5</b> событий	1608 – 2000гг.	$M_{max} = 7.7$	$H_{max} = 2-3$ м
<b>Балтийское море</b>			
<b>21</b> событие	1000 – 2004гг.	$M_{max} \sim 6$	$H_{max} = 4-5$ м
<b>Белое море</b>			
<b>4</b> события	1542 – 1967гг.	$M_{max} \sim ?$	$H_{max} = 1.5$ м
<b>Баренцово море</b>			
<b>5</b> событий	$\sim 500$ – 1883гг.	$M_{max} \sim ?$	$H_{max} = 5$ м
<b>Оз. Байкал</b>			
<b>5</b> событий	1771 – 1963гг.	$M_{max} = 7.5$	$H_{max} = 2-3$ м

В сумме **90** цунамигенных событий вне ДВ региона (**105** соб.)



**Восточное  
побережье  
Камчатки:  
Регулярный прибой  
до 1 м, размах  
приливов до 1.8 м.**

**Побережье Черного  
моря:  
Отсутствие прибоя,  
Максимальный  
прилив 18 см.**



**21.07.2016г., 11:15, пляжи между Сочи и Адлером**



**Объявление тревоги на подобном пляже само по себе опасно, т.к. отсутствует возможность для быстрой эвакуации людей. 2-метровое цунами вызовет неизбежные жертвы. При 3-метровом цунами большинство из находящихся на пляже людей погибнет.**

27.06.2014, Одесса, пляж Черноморка



Одесское цунами  
27 июня 2014 года  
11:50 местного времени  
тихий солнечный день  
Две одиночные волны с  
высотой у кромки  
пляжа  
1.0 – 1.5 м, дальность  
заливания 40-50 м

Жертв не было, но по сообщениям СМИ от 5 до 10 человек получило травмы разной степени тяжести (Никонов, Флейфель, 2015)





**Пример небольшого крымского пляжа. Цунами с высотой 1 метр на подобном пляже будет чрезвычайно опасным. 2-метровое цунами вызовет неизбежные жертвы. При 3-метровом цунами большинство из находящихся на пляже людей погибнет.**

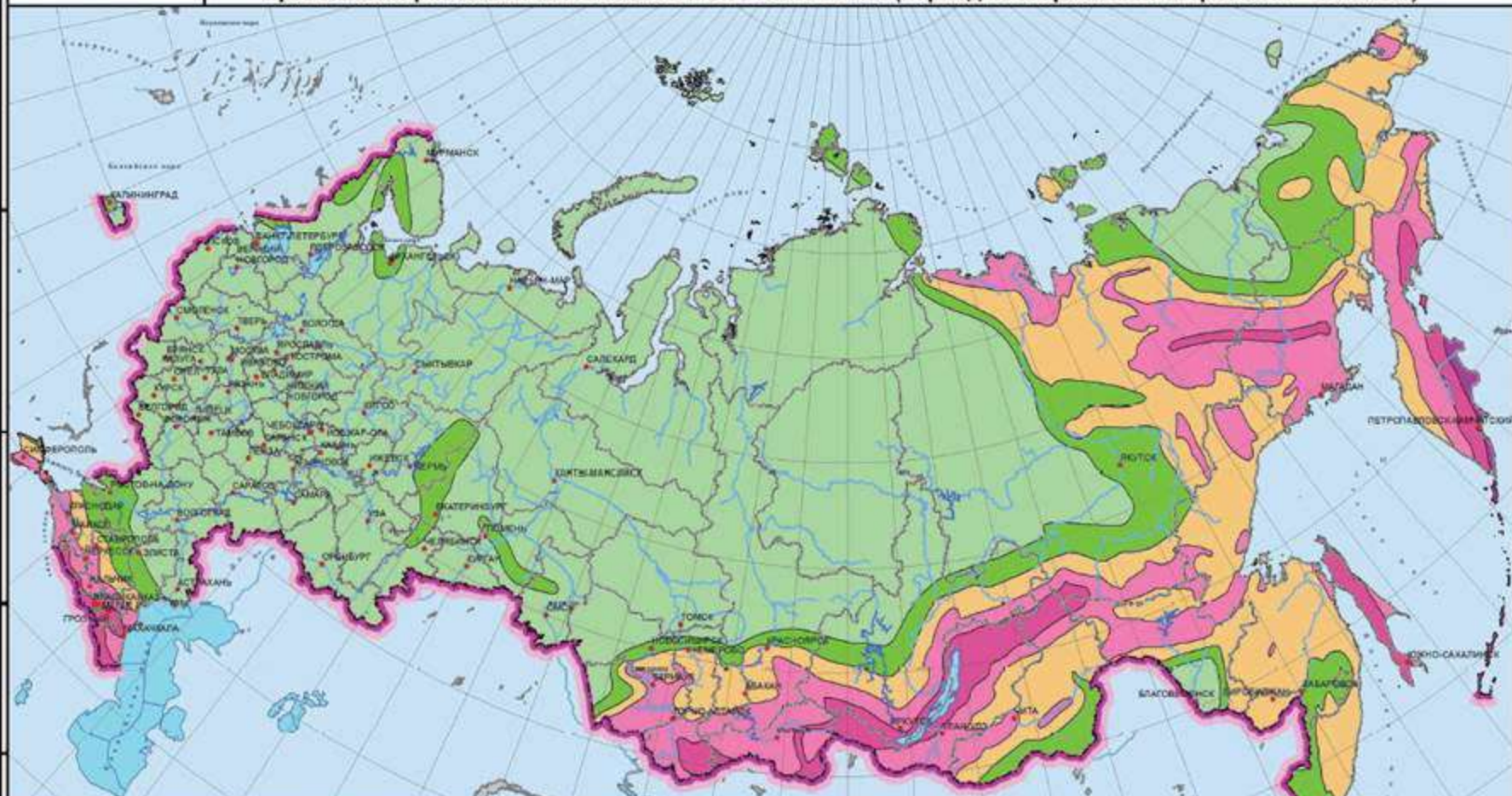
## Заключение по этой части

- ❑ Черное море имеет **долгую и насыщенную историю** разрушительных цунами в прошлом, некоторые из них приводили к большим материальным потерям и сопровождались человеческими жертвами
- ❑ **Опасность цунами** для побережья Черного моря должна быть оценена и **картирована**, и, что самое главное, должна приниматься во внимание при планировании и застройке прибрежных районов
- ❑ Несмотря на то что **уровень цунамиопасности** в Черном море, очевидно, ниже, чем в других подверженных воздействию цунами районах РФ (например, на Камчатке) общий **уровень риска** может быть существенно выше, в связи с высоким уровнем развития инфраструктура и плотностью населения
- ❑ Система оперативного прогноза цунами в Черном море должна строиться **на иных принципах**, отличных от используемых в СПЦ в Дальневосточном регионе

ОСР-2016-В

# ОБЩЕЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОТЯСЕНИЙ (I, баллы), 5%-ная вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет (период повторяемости сотрясений – 1 000 лет)



Ответственные редакторы:

В.И. Уломов – © ИФЗ РАН  
М.И. Богданов – © ООО ИГИИС

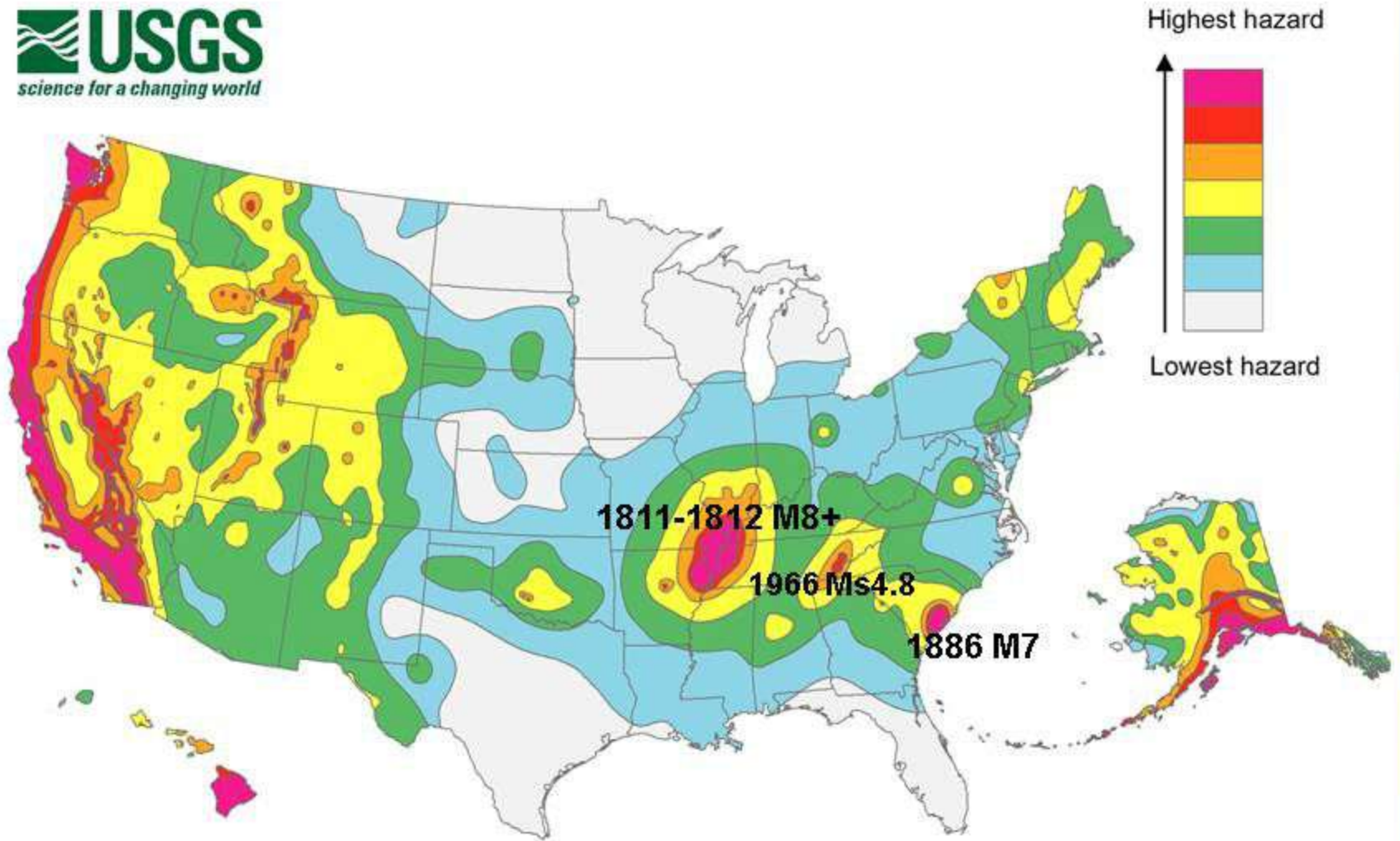
Интенсивность сейсмических сотрясений в баллах



0 280 560 1 120 1 680 2 240 км

**Карта В из комплекта карт сейсмической опасности территории России ОСР-2016, характеризующая повторяемость сейсмических воздействий в среднем один раз за 1 000 лет (Уломов, Богданов, 2016)**





**Карта сейсмической опасности территории США**

## Why is Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Still Used?

Francesco Mulargia<sup>1</sup>, Philip B. Stark<sup>2</sup> and Robert J. Geller<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Fisica e Astronomia, Settore di Geofisica, Università di Bologna, viale Bertini Pichat 8 40127 Bologna, Italy (francesco.mulargia@unibo.it)*

<sup>2</sup> *Department of Statistics, Code 3860, University of California, Berkeley CA, 94720-3860, USA (stark@stat.berkeley.edu)*

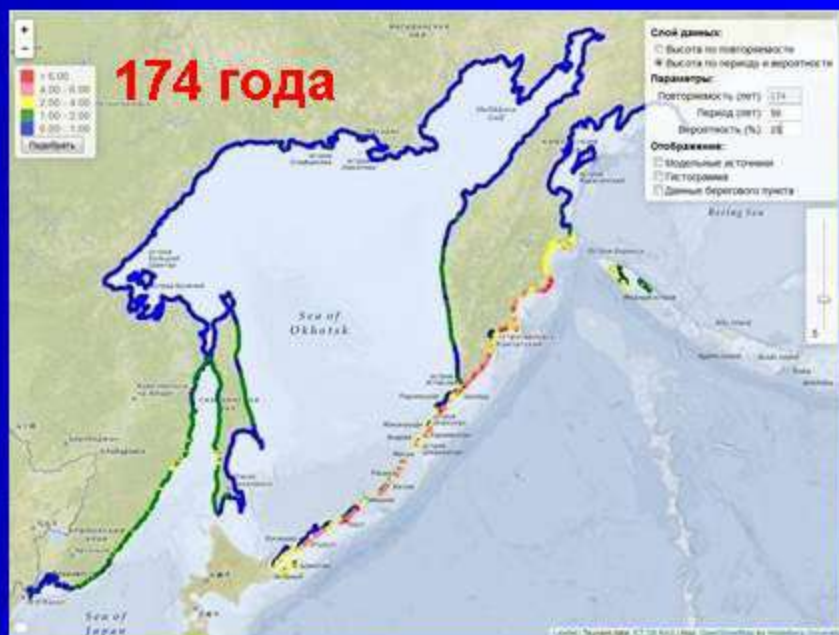
<sup>3</sup> *Department of Earth and Planetary Science, School of Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan (bob@eps.s.u-tokyo.ac.jp)*

---

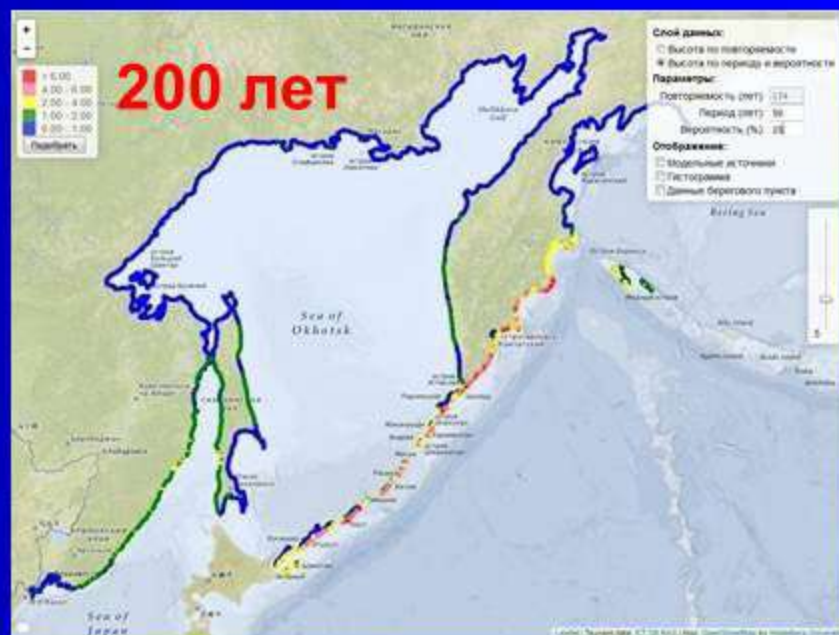
### Abstract

Even though it has never been validated by objective testing, Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) has been widely used for almost 50 years by governments and industry in applications with lives and property hanging in the balance, such as deciding safety criteria for nuclear power plants, making official national hazard maps, and determining earthquake insurance rates. PSHA rests on assumptions now known to conflict with earthquake physics, and many damaging earthquakes have occurred in regions rated low-risk by PSHA hazard maps. No extant method, including PSHA, produces reliable estimates of seismic hazard. Earthquake hazard mitigation should be recognized to be inherently political, involving a tradeoff between uncertain costs and uncertain risks. Earthquake scientists can make important contributions to the hard problem of allocating limited resources wisely, but government officials and stakeholders must take responsibility for the risks of accidents due to natural events that exceed the adopted safety criteria.

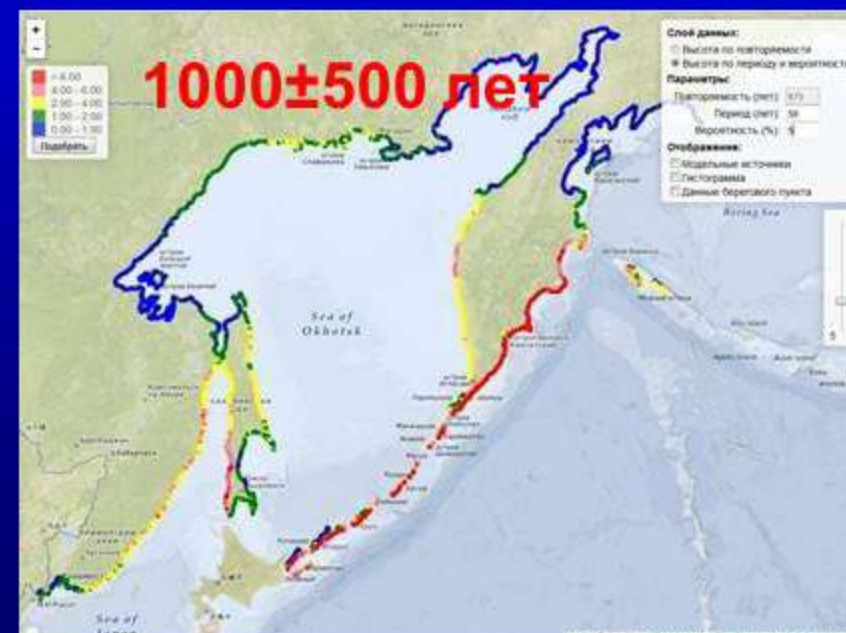
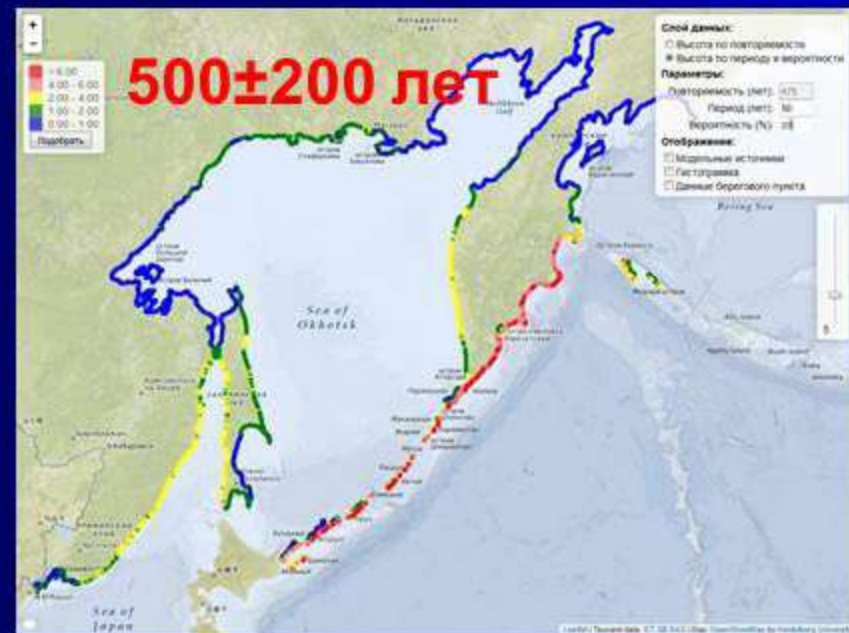
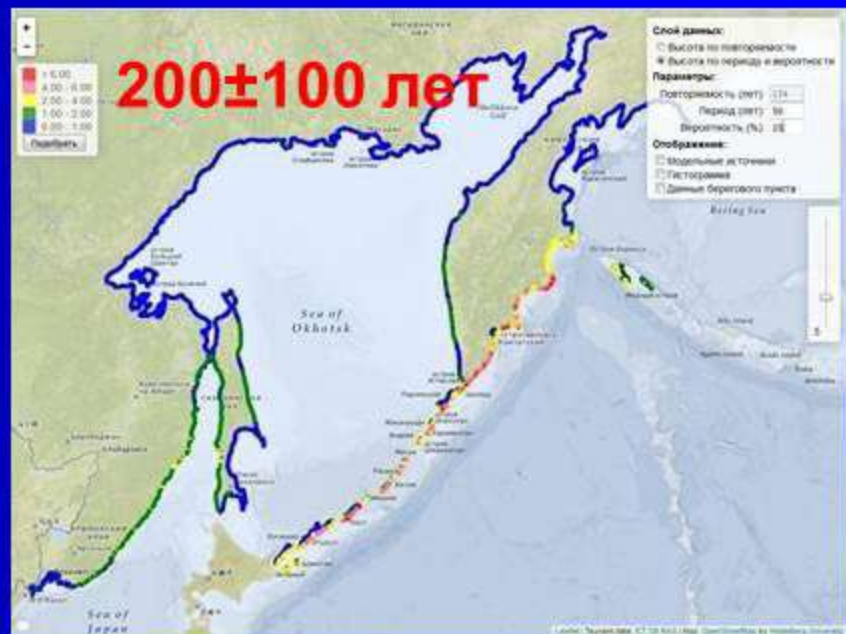
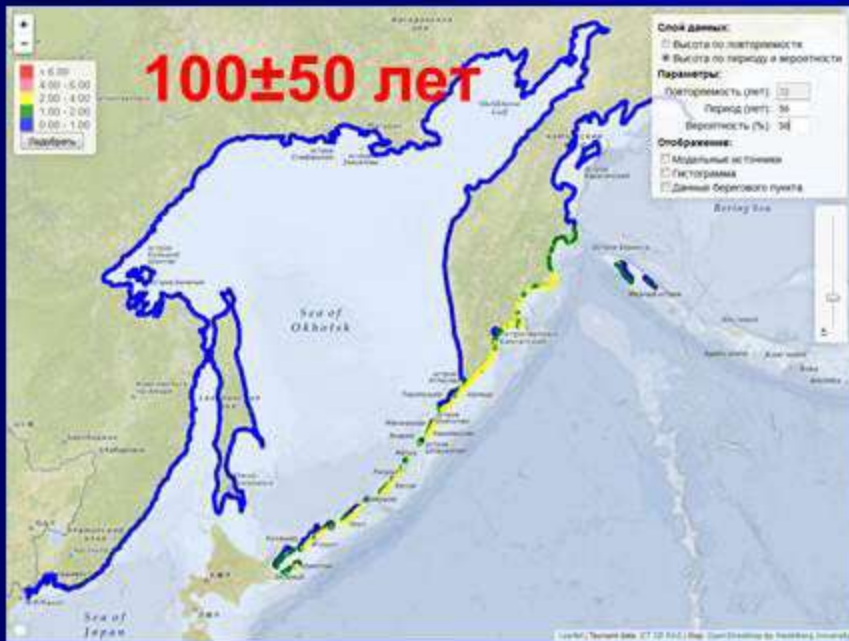
*Keywords:* 91.30.Px Earthquakes; 91.30.Dk Seismicity; 91.55.Jk Fractures and faults; 91.30.Za Paleoseismology



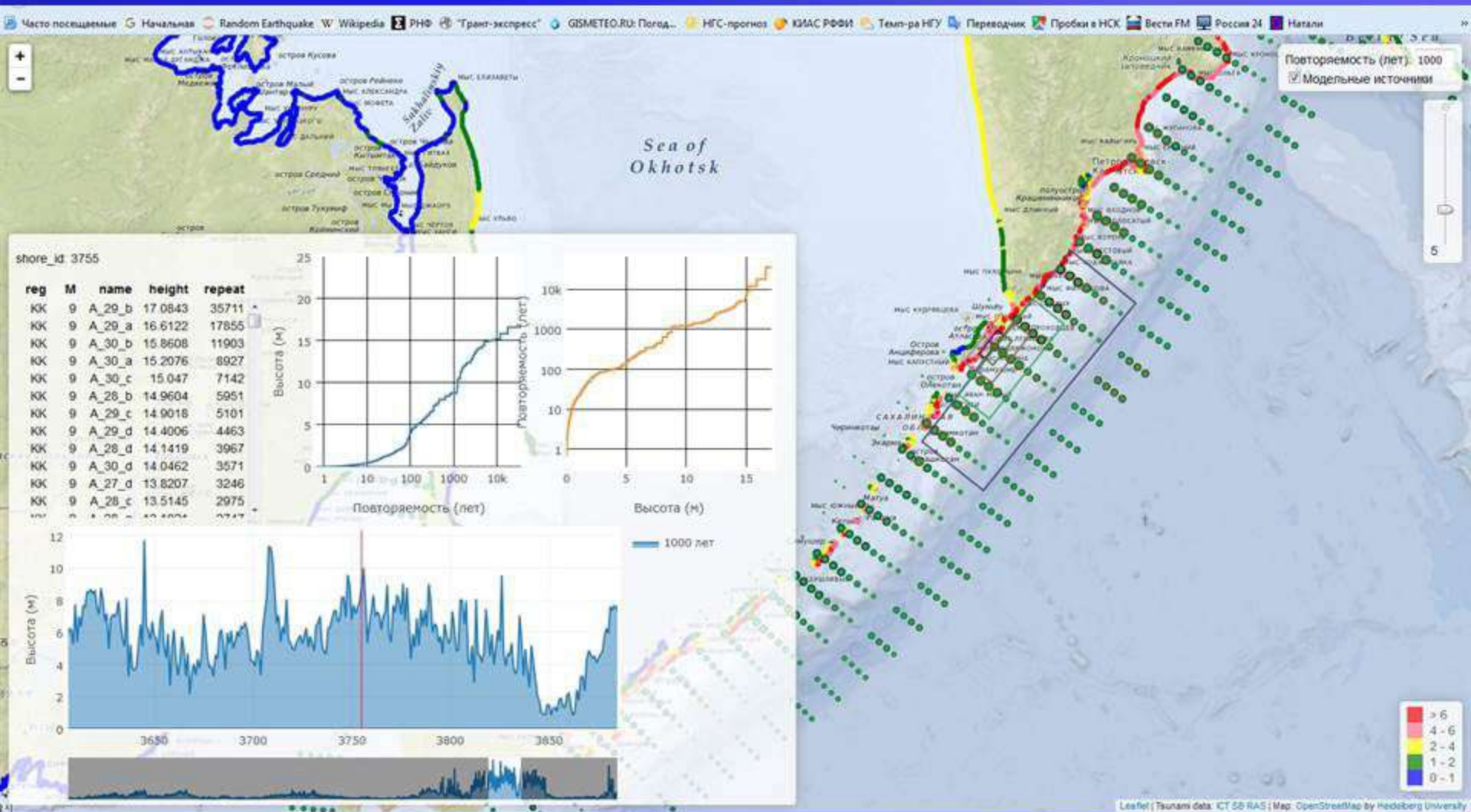
Карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ на интервалы повторяемости 72, 174, 475 и 975 лет. Они показывают, например, высоту с 5% вероятностью превышения в течении 50 лет (повторяемость 975 лет).



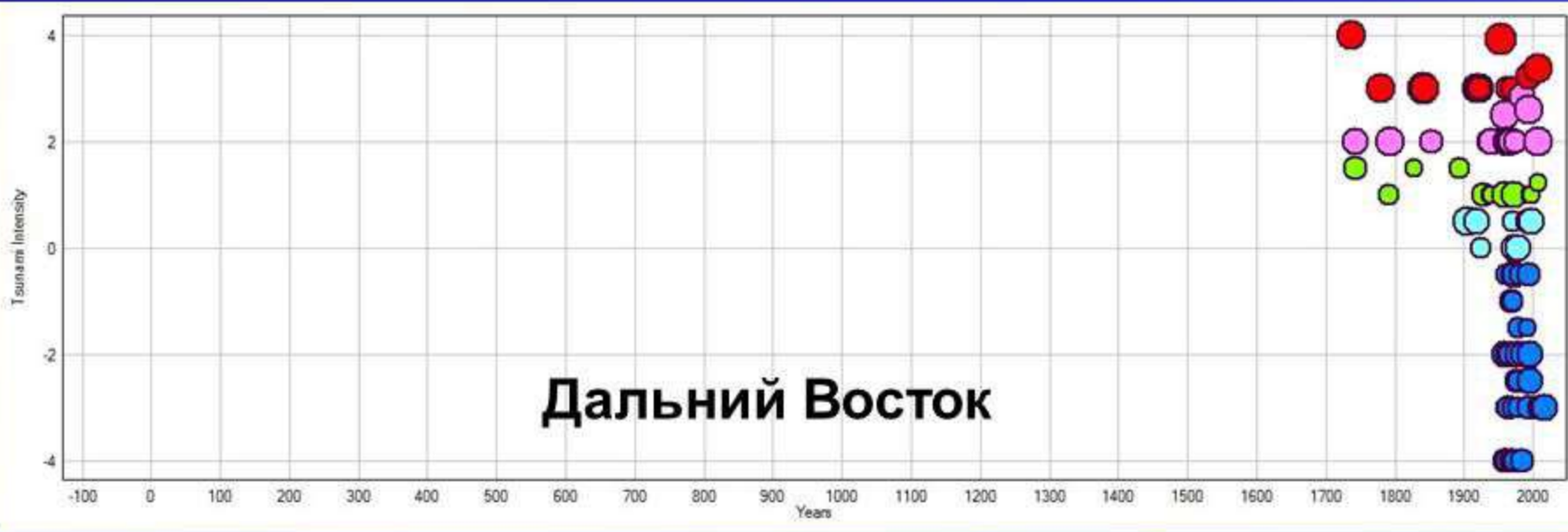
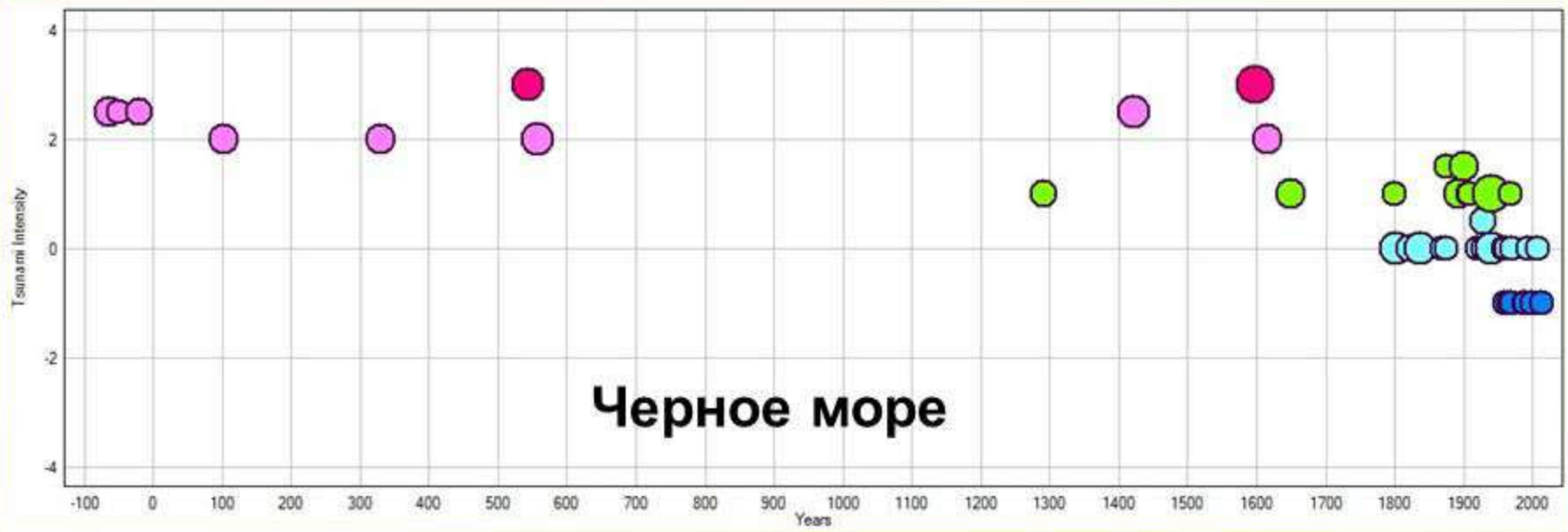
Карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ на интервалы повторяемости 72, 174, 475 и 975 лет. Они показывают, например, высоту с 5% вероятностью превышения в течении 50 лет (повторяемость 975 лет).



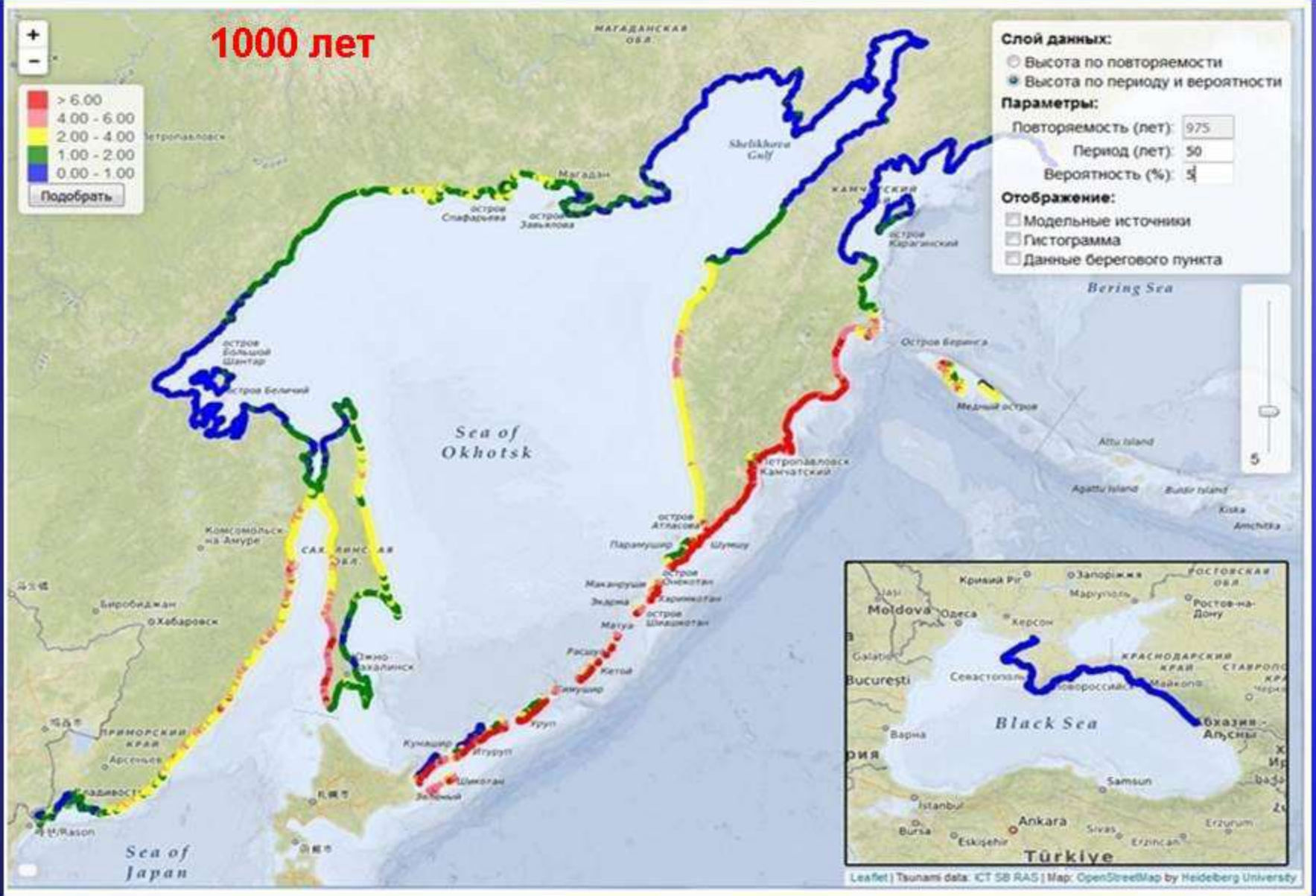
Карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ на интервалы повторяемости 72, 174, 475 и 975 лет. Они показывают, например, высоту с 5% вероятностью превышения в течении 50 лет (повторяемость 975 лет).



**Рабочий экран интерактивной информационно-экспертной системы WTmap для получение карт цунамиопасности**

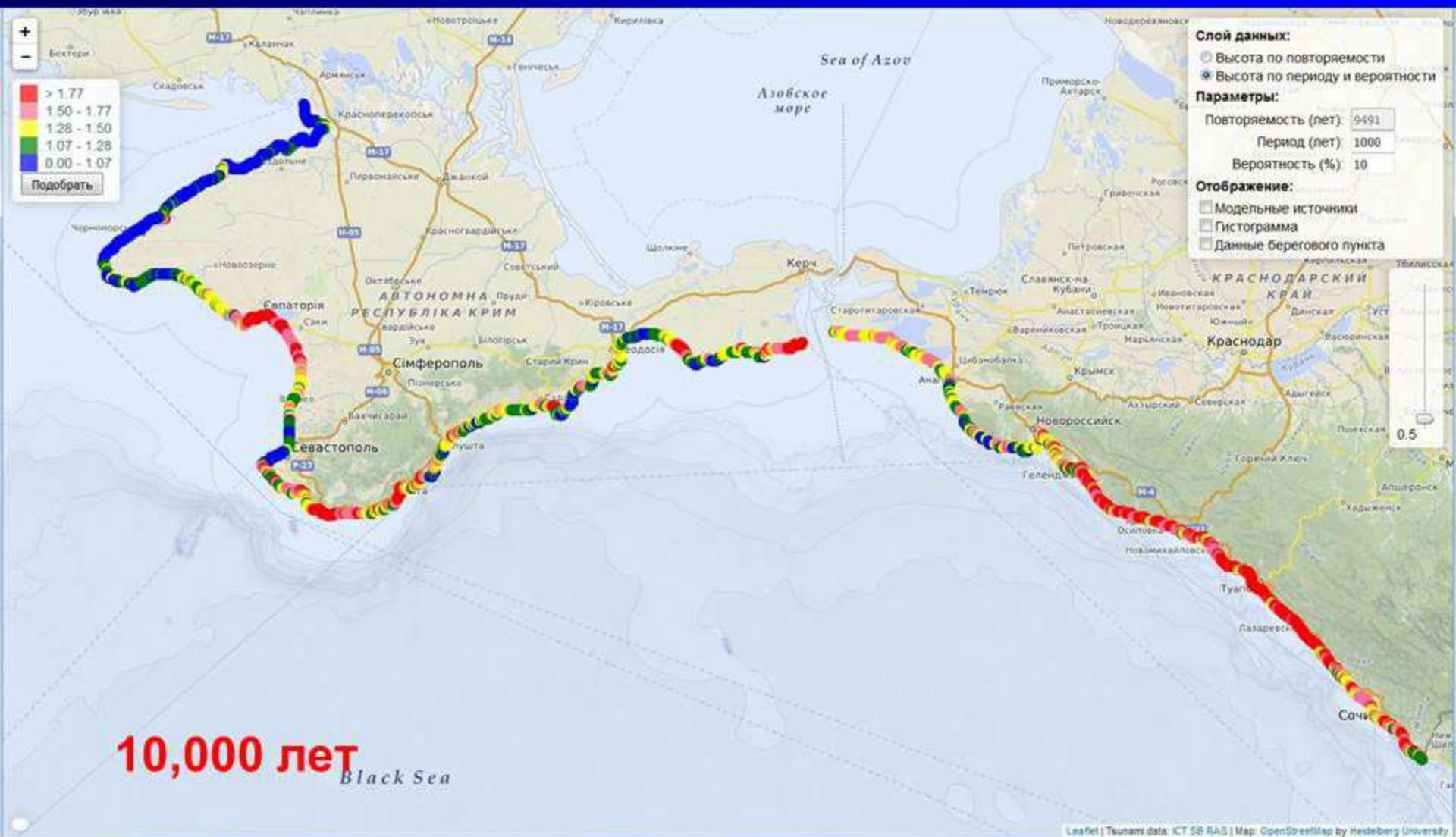


Временная развертка событий черноморского (вверху) и дальневосточного (внизу) исторических каталогов цунами (за последние 2000 лет)

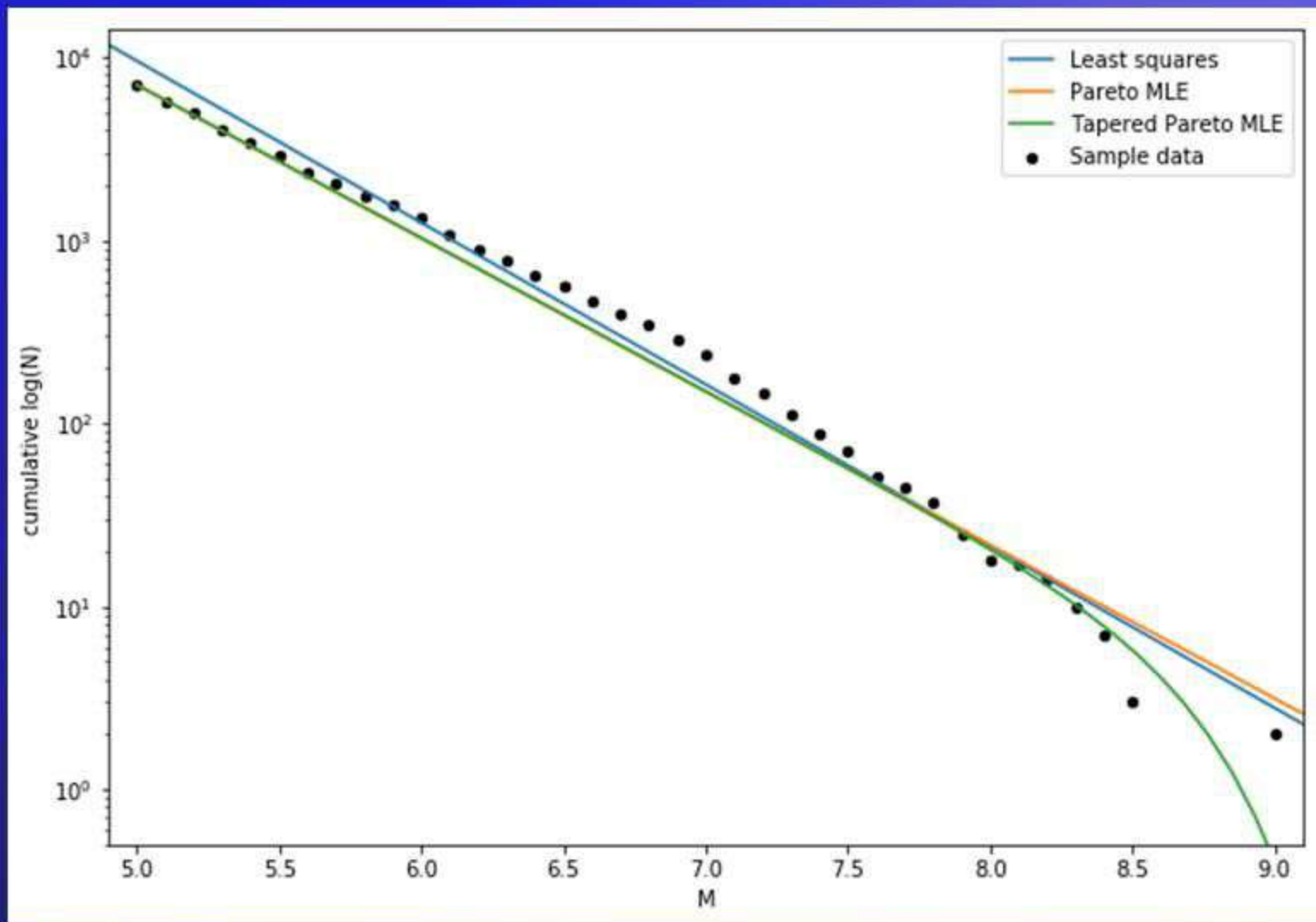


Probabilistic tsunami hazard maps for the Far-East coast of Russia and the Black Sea (insert figure) showing expected wave heights with 5% probability of exceedance during 50 years (return period is 975 years)

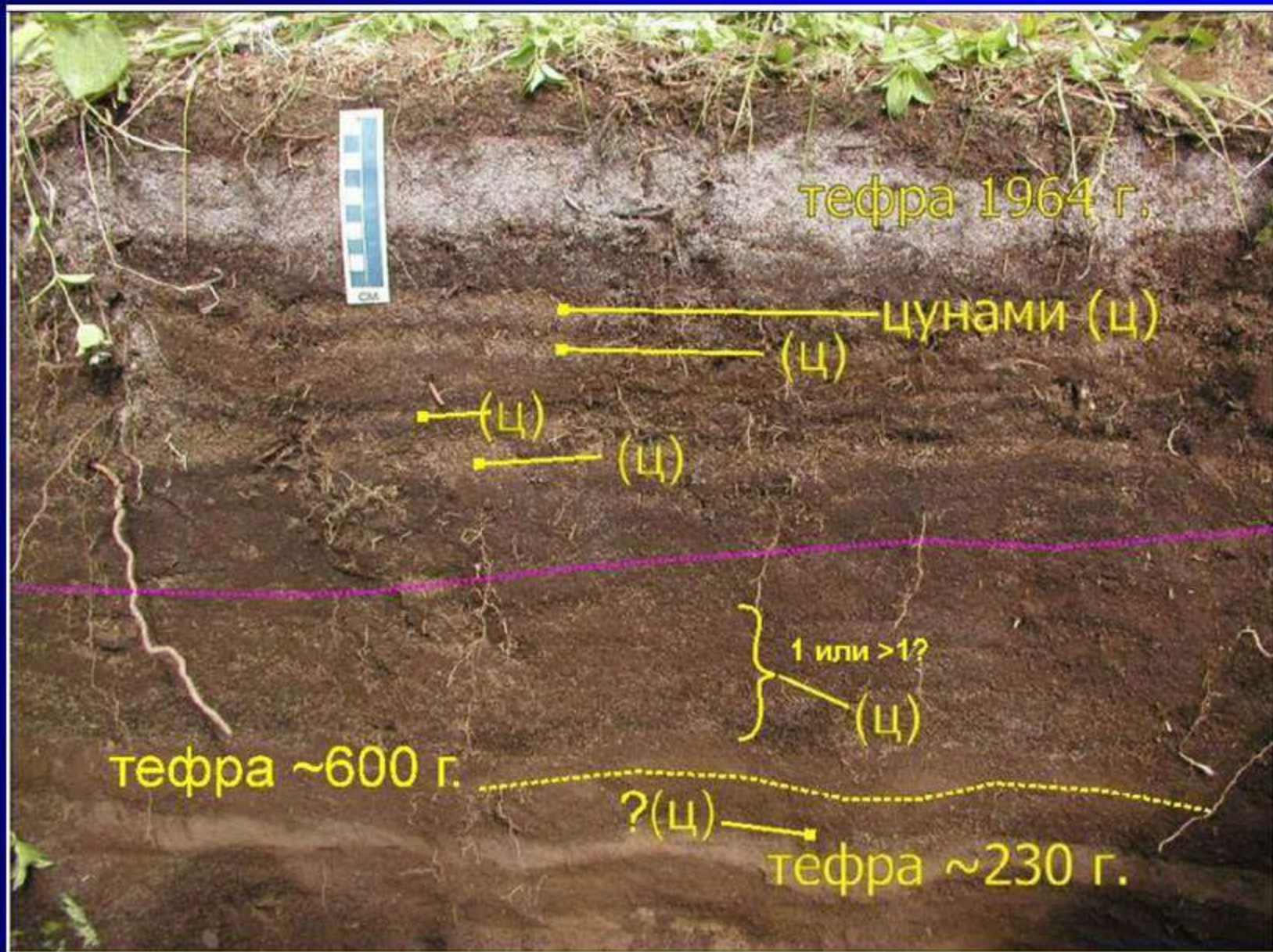




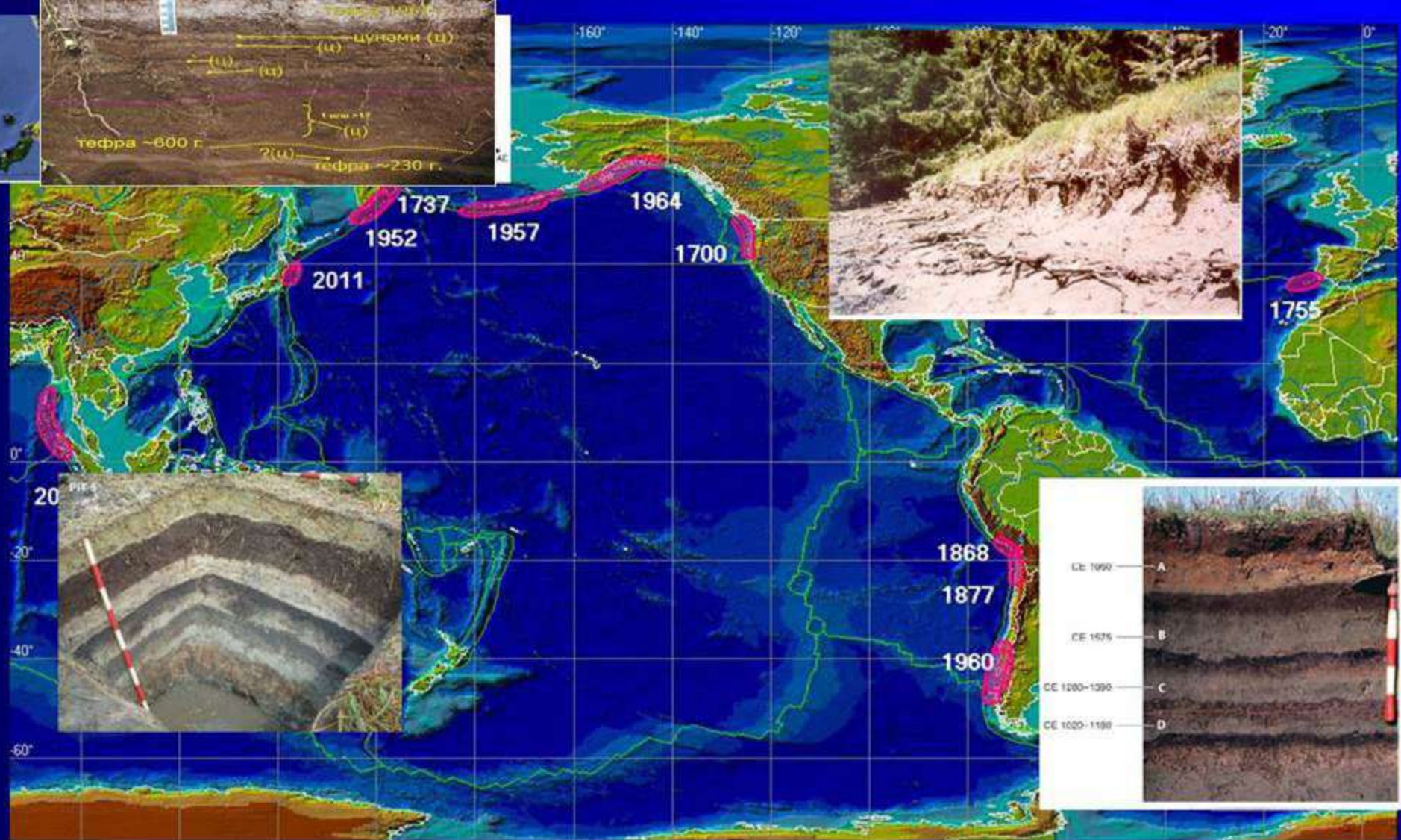
Карта Черноморского побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 10% в течение интервала 1000 лет (средний интервал повторяемости 9491 год).



Закон повторяемости землетрясений (закон Гутенберга-Рихтера) для Курило-Камчатской зоны. Черными точками показано число событий сейсмического каталога за 1700 - 2015гг. с магнитудой  $M > M_i$ . Сплошные линии - его возможные аппроксимации.

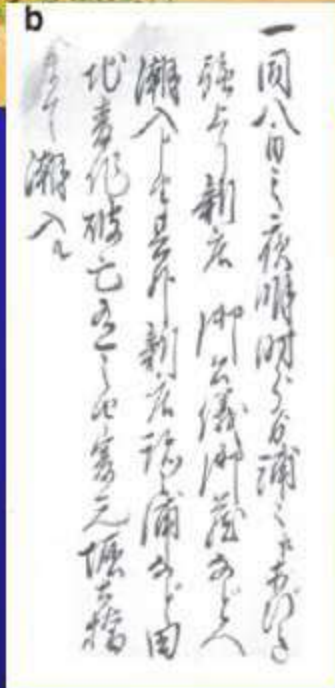


**Tsunamigenic sand layers in the cross-section made at the altitude of 20.5 m on the Kamchatskiy Cape (Pinegina, 2014)**

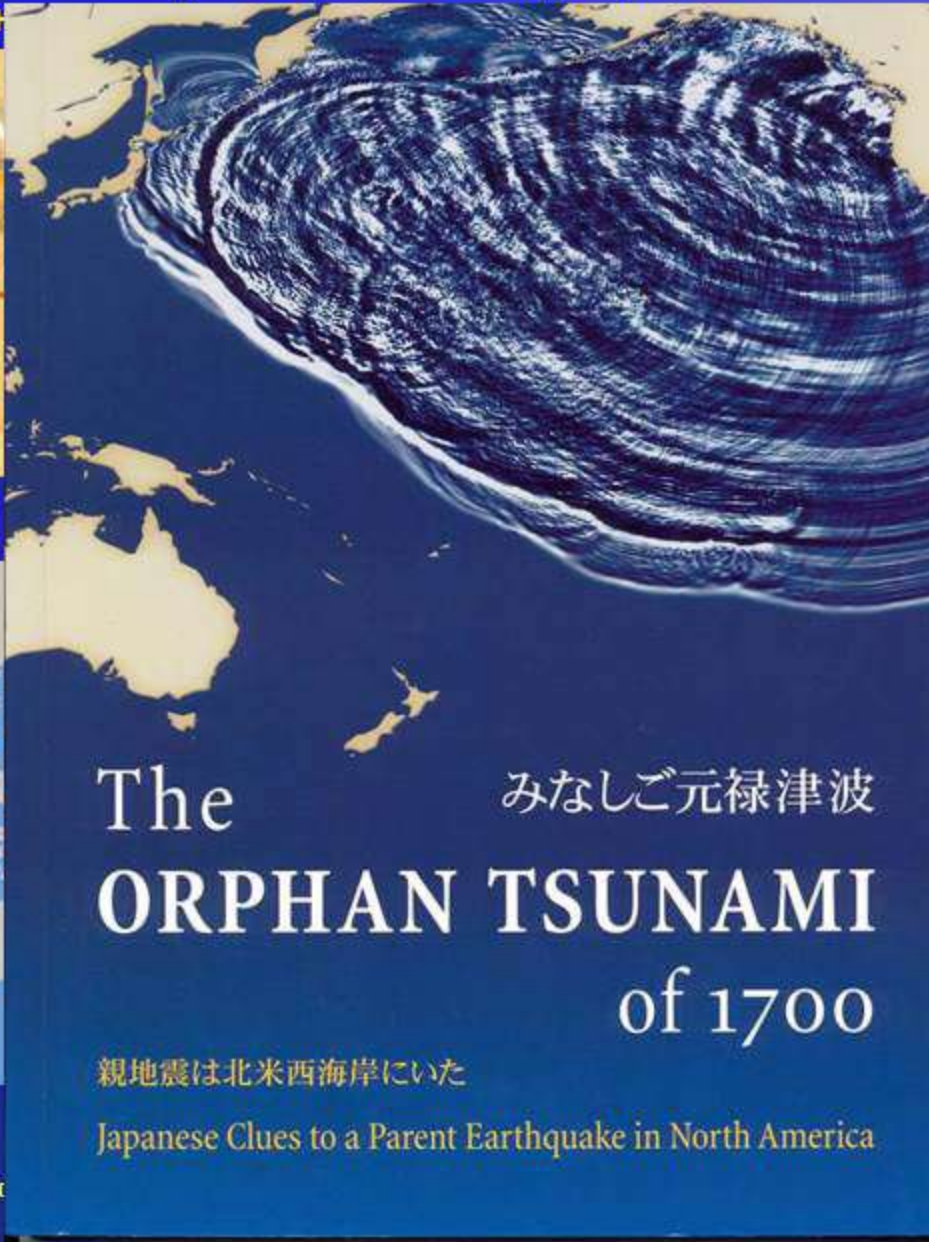


**Source map of mega-tsunamis in the Pacific and Indian oceans occurred from 1700 to present**

Пример комплексного анализа данных различных дисциплин – восстановление параметров мега-землетрясения на побережье США



+



1700 ± 20 M>8.5

+



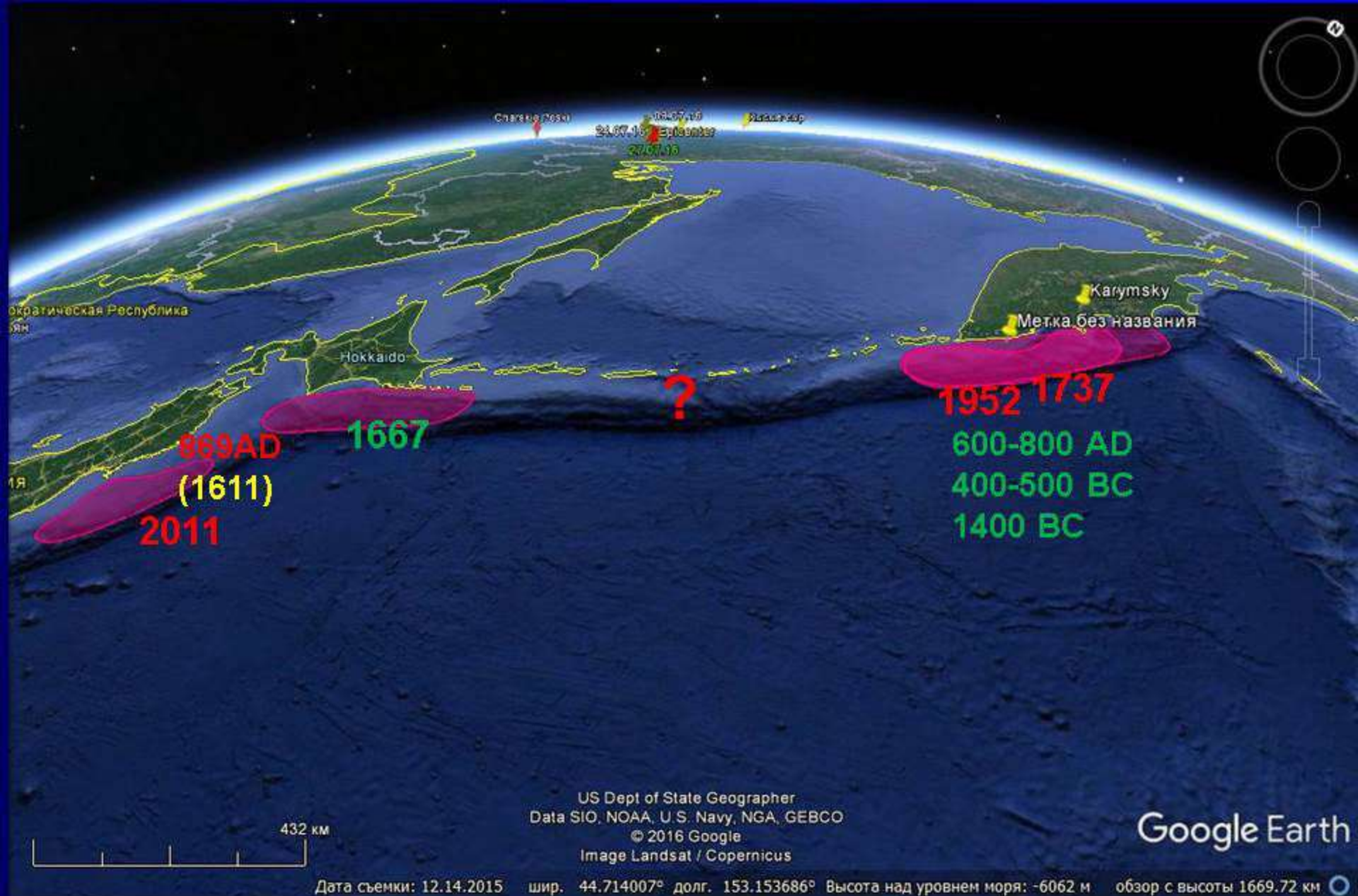
Tree rings  
1700 ± 2

Japanese tsunami records of

Japanese records:  
Jan. 27, 1700 ~06 UTC

Satake K, Shimazaki K, Tsuji Y, Ueda K. 2005. Japanese Clues to a Parent Earthquake in North America. *Nature* 379:246-49

Atwater BF, Musumi-Rokkaku S, Satake K, Tsuji Y, Ueda K, Yamaguchi DK. 2005. The Orphan Tsunami of 1700: Japanese Clues to a Parent Earthquake in North America. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1707. Reston, VA/Seattle, WA: U.S. Geol. Surv./Univ. Wash. Press. 133 pp.



**Очаги исторических и доисторических (палео) цунами в Дальневосточном регионе возникших после мега-землетрясений класса M9**



**Последствия цунами 11 марта 2011 г. в г.Рикудзен-Таката, префектура Мияко. Снимок сделан 22.02.2012 года.**

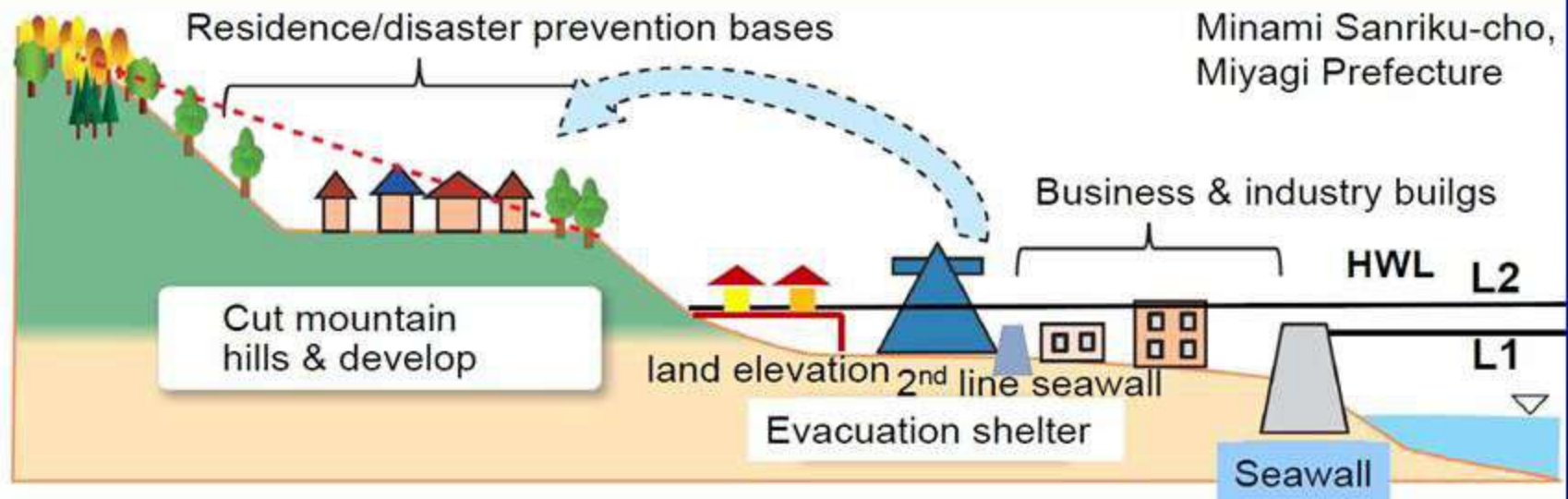
# Reconstruction principles in Tohoku (Central Disaster Management Council, 28 Sept 2011)

## Two levels Approach

Level 1 Tsunami (Frequent scale: 50-150 years)

Life, properties & livelihood

- Sea walls, dikes, highways:



Level 2 Tsunami (Maximum scale: 1000 years) Life

- Move to higher lands
- Tall buildings to evacuate
- Landuse (park, factories, farmland; commercial/business, residential areas)



**Новая (после 11.03.2011) парадигма в подходе к снижению опасности цунами в Японии – двухуровневая стратегия обеспечения безопасности**



## Выводы

- **Современные методологии PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) и PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) или ВАСО (Вероятностный анализ сейсмоопасности) или ВАЦО (Вероятностный анализ цунамиопасности) являются адекватными на сегодняшний день инженерным инструментом для создания карт сейсмо- и цунамирайонирования, но они должны применяться с полным осознанием всех ограничений и недостаточности данных наблюдений (исторических и инструментальных каталогов).**
- **Получение надежных оценок мест расположения очагов и повторяемостей предельно сильных землетрясений (класса M8 и M9) представляет одну из главных проблем в задаче сейсмо- и цунамирайонирования.**
- **Для получения надежных оценок повторяемостей сильнейших землетрясений необходимо полномасштабное использование геологических методов поиска следов палеоземлетрясений и палеоцунами.**



**10 Эволюция методологий оценки сейсмической опасности  
(Muir-Wood R. From global seismotectonic to global  
seismic hazard // Ann/Geoph., 1993, XXXVI, No.3-4, 153-168)**

- 1) «Исторический детерминизм» (Historical determinism) - картирование максимальных сотрясений, зафиксированных в историческом прошлом**
- 2) «Исторический пробабилизм» (Historical probabillism) - оценка вероятностей повторения сотрясений определенной силы, в течение заданного промежутка времени**
- 3) «Сейсмотектонический пробабилизм» (Seismotectonic probabillism) - то же что (2), но с учетом палеоданных и сейсмотектоники региона (Cornell, 1968)**
- 4) «Непуассоновский пробабилизм (Non-Poissonian probabillism) - то же что (3), но с учетом времени, прошедшего с момент последнего «значительного» события**
- 5) «Прогноз землетрясений» (Earthquake prediction) - концентрация усилий на уточнении момента возникновения «значительного» землетрясения, его местоположения и силы (Паркфилд, США; Токай, Япония).**

## Этапы развития методологии сейсмического районирования территории России

1937г. – первая карта сейсмического районирования территории СССР. (ред. Г.П. Горшков). Парадигма «сейсмического актуализма». Была включена в Правила антисейсмического строительства, М., Гостройиздат, 1937, 28с.

1957г. - вторая карта сейсмического районирования территории СССР (Ред. С.Д. Медведев). «Сейсмогенетический двухстадийный метод оценки сейсмоопасности с элементами прогноза»

1968г. – ОСР-69. третья карта сейсмического районирования территории СССР (Ред. С.Д. Медведев)

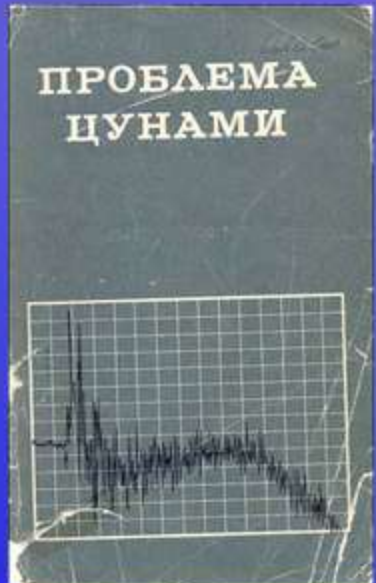
1978г. - ОСР-78. четвертая карта сейсмического районирования территории СССР (Ред. М.А. Садовский). Первое появление повторяемости сотрясений.

1997г. - ОСР-97. Пятая карта сейсмического районирования территории РФ (Ред. В.Н. Страхова, В.И. Уломов). Вероятностный анализ сейсмической опасности – «методика ВАСО»

2015 - ОСР-2015 (Ред. В.А. Рогожин)

2012-2016гг. - ОСР-2016. Шестая карта сейсмического районирования территории РФ (Ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов)

Между тем, еще в **1968 году** С.Л.Соловьевым (Соловьев, 1968) был указан другой подход к решению задачи цунамирайонирования, являющийся комбинацией положительных моментов обеих методик, и сформулированы его основные элементы, которые заключаются в следующем:



- (1) оценка по сейсмологическим данным вероятности вертикальных подвижек разной интенсивности во всех точках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны;
- (2) пересчет деформаций дна в деформацию поверхности океана;
- (3) переход, путем построения рефракционных диаграмм, от вероятностных характеристик подъема воды в зоне источника к вероятностной характеристике высоты цунами на некоторой близкой к побережью изобате;
- (4) нахождение, с учетом особенностей прибрежного рельефа, вероятностных характеристик высоты подъема воды на урезе и ширину зоны затопления.

**Lhonga Beach, North-Western Sumatra, 2004**



**Последствия Индонезийского цунами 26.12.2004 г. на западном побережье о-ва Суматра (227,899 погибших).**



**Miyako Harbor, Japan, 11.03.2011**

**Over the top.** The 11 March tsunami overwhelmed a coastal seawall in Miyako City designed for lesser waves.

**Цунами Тохоку 11.03.2011. Первая волна цунами переливается через защитную стенку, ограждающую берег залива в городе Мияко (18,453 погибших)**