



Международная конференция «Математические и информационные технологии, MIT-2011»

(IX конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»)

Врнячка Баня, Сербия, 27-31 августа 2011 г.

Будва, Черногория, 31 августа – 5 сентября 2011 г.

Вычислительные и информационные системы поддержки принятия решений в ходе кризисных ситуаций, связанных с катастрофическими волновыми процессами в акваториях

<http://tsunami.esemc.nsc.ru/>

Ю.И.Шокин, Л.Б.Чубаров

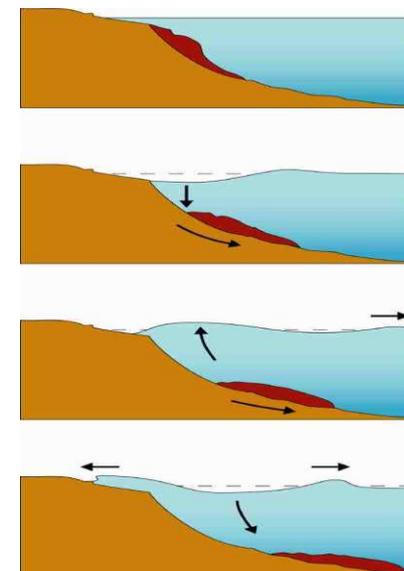
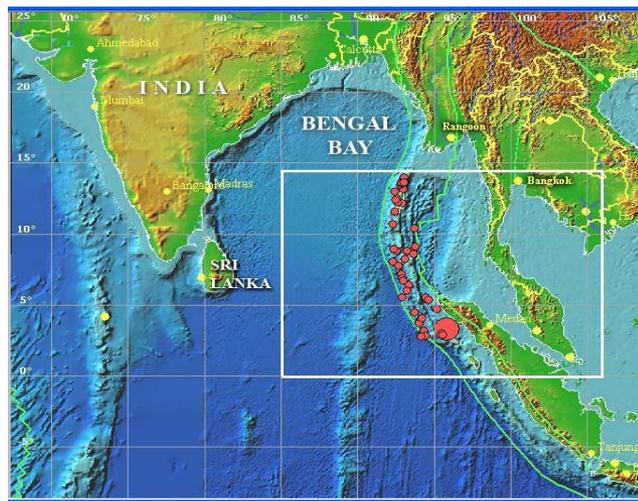


Разномасштабность

- * Локальные
- * Региональные
- * Трансокеанские

Разнопричинность

- * Сейсмические
- * Климатические
- * Вулканические
- * Оползневые
- * Стоковые
- * Взрывные...
- * Обвальные...



■ **Многоэтапность** (генерация, распространение, накат)

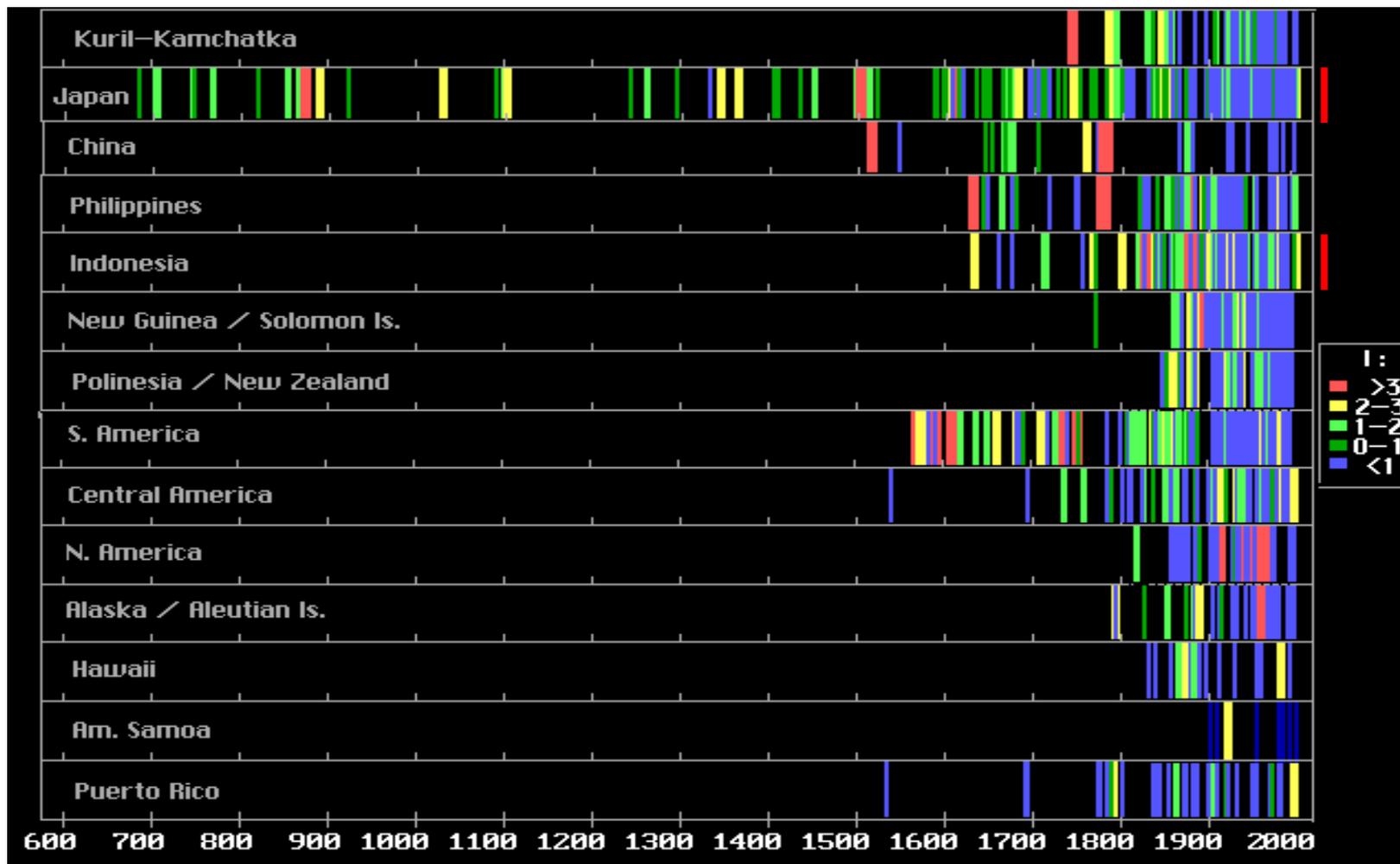
■ **Разномодельность** (приближенные, полные модели волновой гидродинамики)

■ **Разнообразие фундаментальных задач**

■ **Две главных прикладных задачи** (районирование, оперативный прогноз)

Тайна возникновения, невозможность противостояния, катастрофичность воздействия, быстрая забываемость



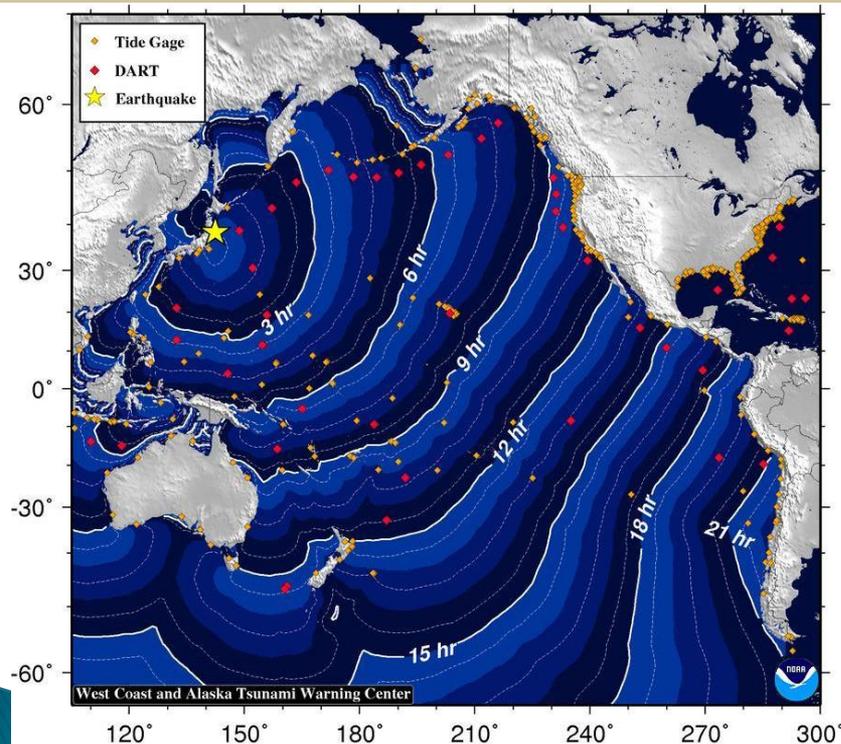


Относительная длина и полнота каталогов цунами для регионов Тихого океана

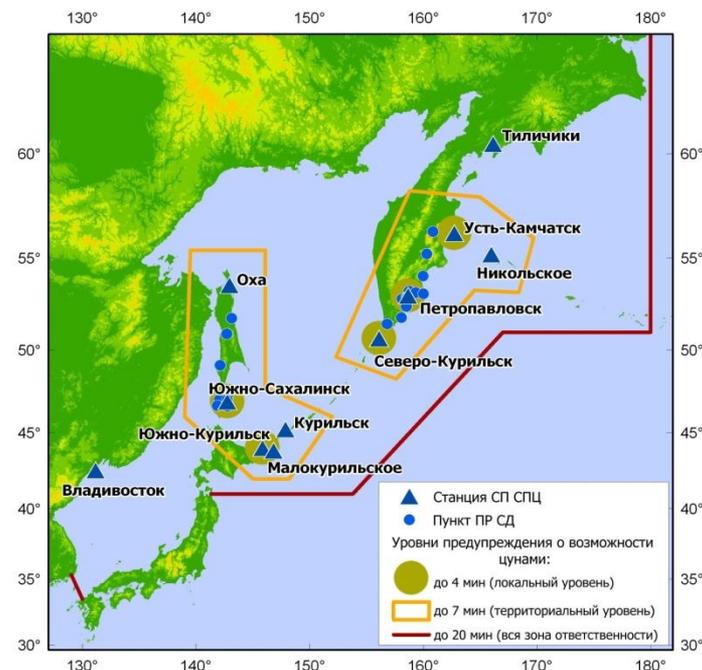


Национальные системы предупреждения о цунами:

- Австралия
- Индонезия
- Новая Зеландия
- Россия (СССР) после события 1952 г. в Северо-Курильске
- США (PTWS – Гонолулу и Анкоридж)
- Чили
- Япония (JMA) и др.



Гидрофизическая подсистема.
(В РФ – Росгидромет)
• мареографы и
• донные станции системы DART



Сейсмическая подсистема.
В РФ – ГС РАН



Действия Службы предупреждения о цунами в Японии, России и США

0 мин Момент землетрясения 05:46 UTC 14:46 JST

4 мин Первое сообщение ЯМА. Ms=7.9. Сигнал «Тревога цунами» для префектур Мияги, Ивате и Фукусима, сигнал «Цунами») для трех соседних префектур Аомори, Ибараки и Чiba. Сигнал «Возможное цунами» был выпущен для других 15 береговых префектур Японии

4 мин ЦЦ в Ю-Сахалинске получил сообщение ЯМА о тревоге цунами

5 мин Список ожидаемых времен прихода и высот цунами вдоль всего побережья Хонсю

6 мин ЦЦ в Ю-Сахалинске получил сообщение с/с ЮСХ о регистрации сильного землетрясения

9 мин Бюллетень №1 ТЦПЦ. Ms=7.9 Предупреждение о цунами для побережья Японии, России, Марианских островов и о-ва Маркус

12 мин ЦЦ в Ю-Сахалинске выпустил сигнал «Тревога цунами» для Курильских островов

28 мин ЯМА: расширение зоны сигнала «Опасное цунами», для префектур Аомори, Ибараки и Чiba

57 мин Бюллетень №2 ТЦПЦ. Ms=8.8 Зона тревоги расширена до о-вов Уэйк и Тайвань

1:44 мин Бюллетень №3 ТЦПЦ. Ms=8.8 Зона тревоги распространена на весь Тихий океан

.....
24:50 мин Бюллетень №27 ТЦПЦ. Отмена статуса тревоги для всего Тихого океана





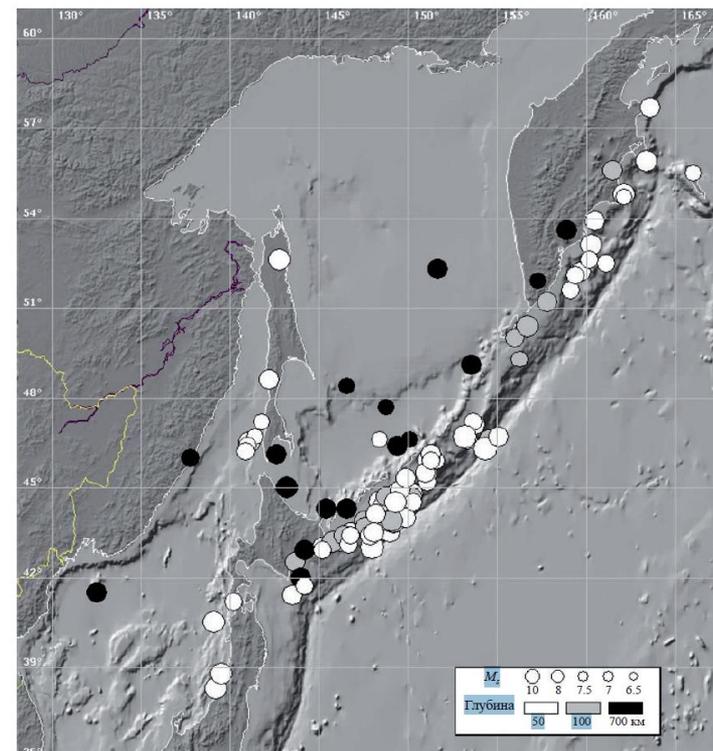
Дальневосточный регион разделен на три отдельные зоны

- Курило-Камчатская зона,
- Японское море,
- Охотское море).

За весь исторический период наблюдений не было зарегистрировано случаев выхода опасного цунами за пределы его зоны возникновения.

Основная масса подводных землетрясений, требующих оперативной обработки и оценки их цунамиопасности, происходит в **Курило-Камчатской зоне (77%)**.

На **зону 2 (Японское море)** приходится **11%** событий, на **зону 3 (Охотское море)** – **12%**, причем подавляющее большинство из них являются глубокофокусными землетрясениями с глубинами очагов в диапазоне 100–600 км.



Диаметр кружков пропорционален магнитуде, цветом показана глубина очага:

- белый – мелкофокусные ($h < 33$ км),
- серый – промежуточные ($100 \text{ км} > h > 33$ км),
- черный – глубокофокусные ($H > 100$ км)

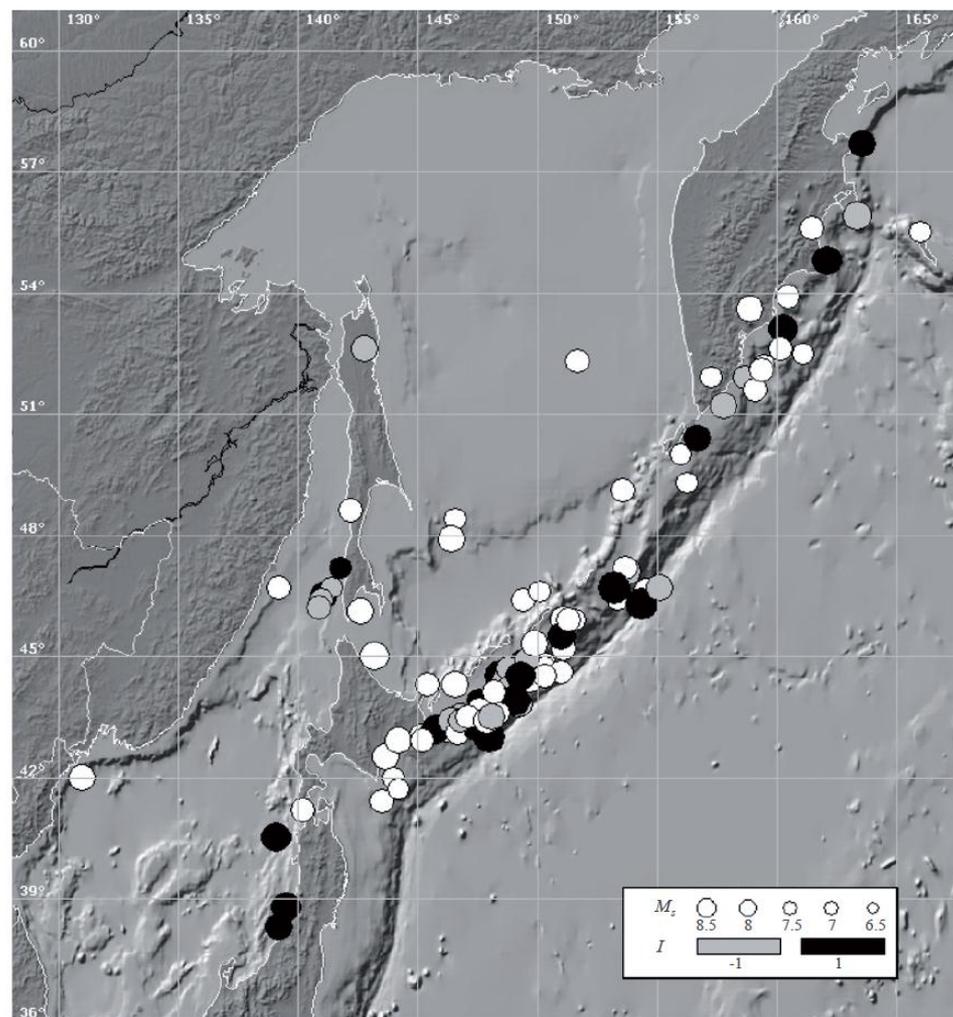
В.К. Гусяков Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46, № 3, с.5-21



- **разрушительные, опасные и ощутимые** цунами – **черный** цвет,
- **слабые цунами** – **серый**,
- **нецунамигенные** – **белый**.

Все подводные землетрясения с глубинами очагов более 100 км - нецунамигенные.

Землетрясения начинают возбуждать цунами на глубинах 70–80 км, а все действительно опасные цунами возникли от мелкофокусных землетрясений с глубинами гипоцентров в пределах верхних 50 км.





В работе [Соловьев, Шебалин, 1959] было предложено **пороговое значение магнитуды** для объявления тревоги цунами по **Курило-Камчатской** зоне, равное **7.0**, которое фактически используется до сих пор.

- В «переходной» $M_{пор} = 7.5$
- В «дальней» $M_{пор} = 8.0$

Главной причиной «пропусков тревоги» явились

- систематическое занижение оперативной оценки магнитуды,
- несвоевременность ее определения,
- ошибки в определении координат и
- другие недостатки в организации работы службы.

Среди **40 «пропущенных»** землетрясений:

- большинство (**31**) **нецунамигенные**,
- **6 – слабое цунами** ($H =$ несколько десятков см., тревога при которых была бы «**ложной**»;
- **3 сильных** цунами - **жертв не было** (Урупское 20.10.1963 г., Монеронское 05.09.1975 г. и Шикотанское 10.06.1975 г.).

С 1958 по 1980 год по данным групповой обработки сети станций ЕССН было определено **76 региональных** землетрясений с $M \geq 7.0$.

Только 13 вызвали **опасное** ($H > 0.5$ м) цунами на Дальневосточном побережье, **в 20 случаях** цунами было **слабым**, наблюдавшимся только на записях мареографов, **в 43 случаях** цунами **не было** совсем. **Тревоги были поданы только для 36 землетрясений.**

Неудовлетворительный результат:

Из 36 поданных тревог

- **10 «оправдавшихся»** ($H > 0.5$ м),
- **26 «ложных».**

Оправдавшиеся тревоги составили 28% от числа поданных, которые, в свою очередь, подавались **лишь в 47% случаев** подводных землетрясений с магнитудой выше пороговой.



В статье [Воробьева и др., 1983] был сделан подтвердившийся практикой вывод:
*«в случае сохранения действующих критериев прогноза при дальнейшем техническом совершенствовании службы
 ее эффективность будет снижаться за счет возрастания числа ложных тревог»*

За **1958 – 2009** гг. было **101** сейсмическое событие с магнитудой больше порогового значения :

- **5 разрушительных** ($H > 5$ м),
- **9 опасных** ($5 \text{ м} \geq H > 1.5$ м),
- **9 ощутимых** ($1.5 \text{ м} \geq H > 0.5$ м) и
- **20 слабых** ($H \leq 0.5$ м) цунами.

Никаких, даже слабых цунами, **не возникло после 55** подводных землетрясений.

Пропущенные цунами

Из **101** землетрясения с магнитудой > 7.0 , тревога подавалась **только для 67** землетрясений, **в 34** случаях она оказалась пропущенной.

Основная причина пропуска – **занижение оперативной оценки магнитуды.**

Только 43% землетрясений с магнитудой выше пороговой - **цунамигенные.**

Если **исключить слабые цунами** (с $H \leq 0.5$ м), то **доля цунамигенных снижается до 23%.**

При точном следовании регламенту **77% тревог должны были оказаться ложными.**

- **20 нецунамигенные,**
- **8** возбудили **слабое** цунами (с высотами менее 50 см),
- в **1** одном случае (Ниигатское цунами 16.06.1964 г.) высота **составила 60 см,**
- в оставшихся **5** случаях цунами оказалось **сильным и даже разрушительным:**

• Урупское (20.10.1963) и Шикотанское (10.06.1975) – **«цунами-землетрясение»**

• Акитское цунами (26.05.1983) – **неверное определение эпицентра,** ошибка была исправлена

• Магнитуда Невельского землетрясения 02.08.2007 г. **была определена, но оказалась ниже пороговой**



Период	N	T	T_0	W	W_0	W/N	W_0/W	T_0/N	W_0/T_0
1958–1983гг.	67	30	15	38	10	57%	26%	22%	67%
1984–2009 гг.	34	13	8	29	7	85%	24%	23%	87%
Весь период	101	43	23	67	17	67%	25%	23%	74%

N – общее число землетрясений с $M \geq M_{пор}$;

T – общее число цунами, наблюдавшихся на побережье РФ;

T_0 – число опасных цунами (с высотами $H_{max} > 0.5$ м);

W – число тревог, поданных службой предупреждения;

W_0 – число оправдавшихся тревог (поданных перед опасными цунами),

а также соотношения между этими параметрами, характеризующие:

W/N – **общая эффективность работы службы;**

W_0/W – **оправдываемость тревог;**

T_0/N – **ожидаемая эффективность прогноза;**

W_0/T_0 – **коэффициент предупреждаемости опасных цунами.**



Удаленные цунами

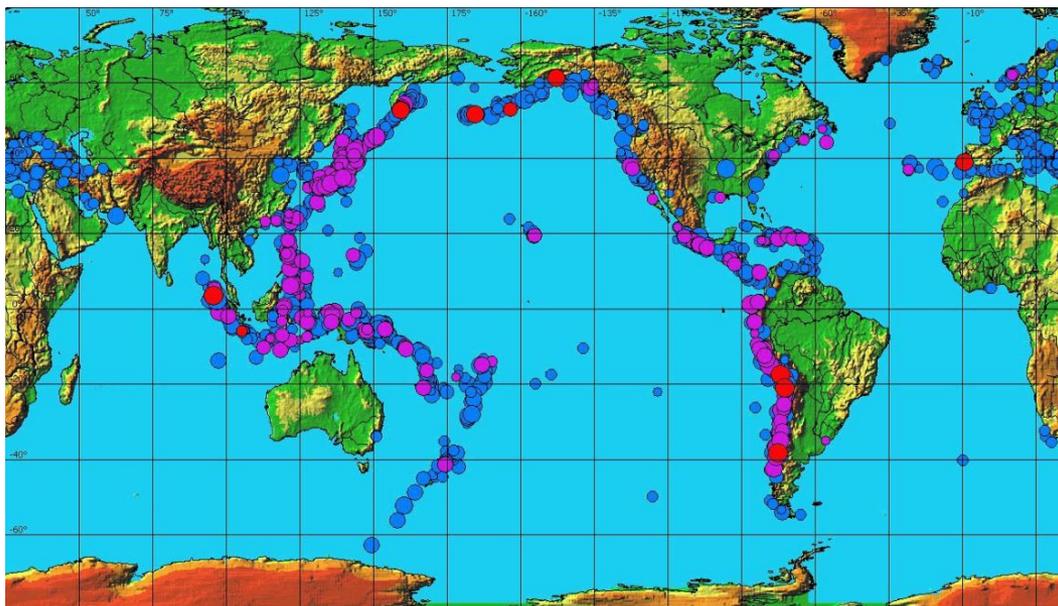
С 1958 по 1980 год в Тихом океане произошло 14 землетрясений с $M > 7.5$ и 8.0:

- **Пропущены 5** (волны цунами при них на побережье РФ не наблюдались),
- **Подано - 9** тревог:
 - **Ложных - 7,**
 - **Оправдались - 2:**
 - *Чилийское* (22.05.1960 г.) – Н до 3–4 м (Охотское побережье), 5–6 м (Курилы, восточное побережье Камчатки),
 - *Аляскинское* (28.03.1964 г.)– Н < 1 м (о-в Парамушир).

Главный резерв дальнейшего совершенствования службы **в снижении числа ложных тревог** (при сохранении на разумно низком уровне риска пропуска сильного цунами) на основе

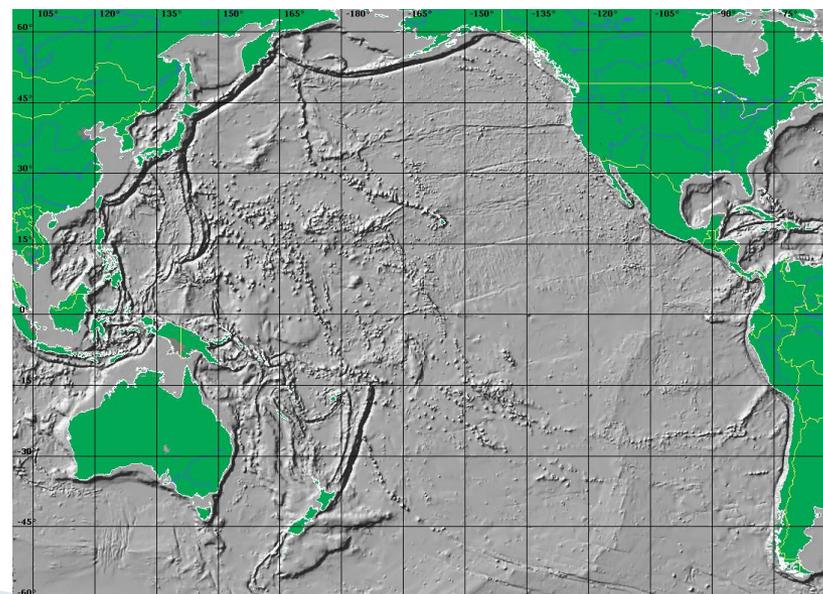
- привлечения **дополнительных критериев и признаков цунамигенности** (глубина очага и др.);
- за счет более точного определения границ зон для объявления тревоги.

Такой пересмотр должен быть сделан на основе анализа фактических наблюдений высот цунами и **численного моделирования распространения цунами внутри каждой из зон при различных положениях и размерах очагов.**



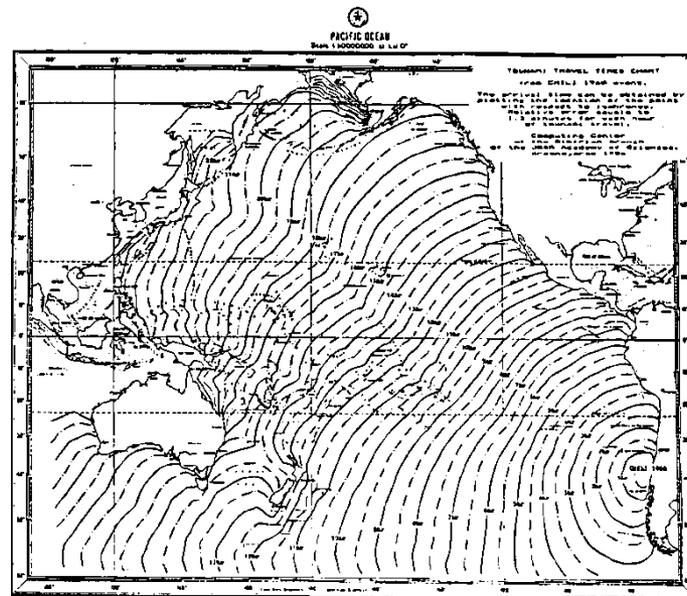
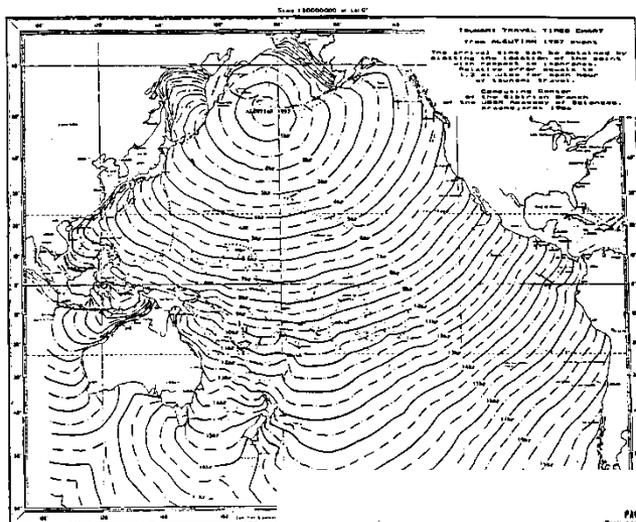
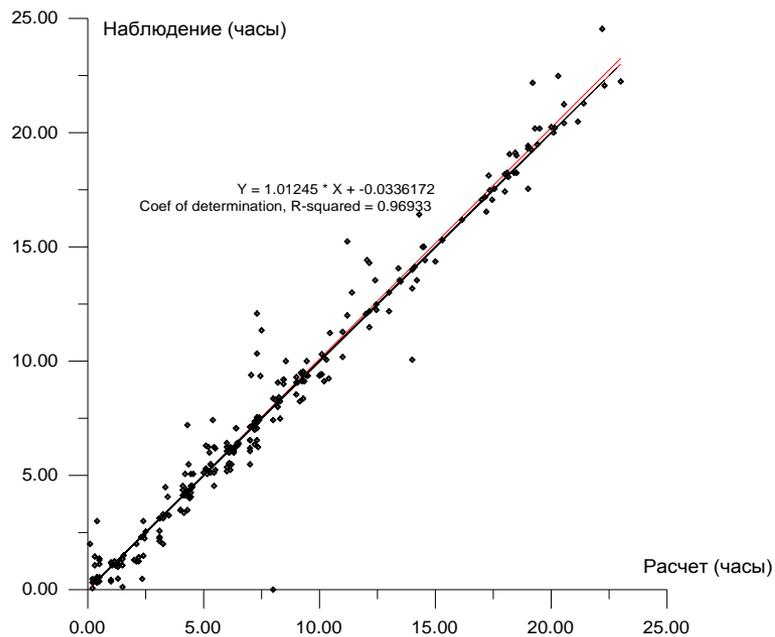
Карта исторических источников цунами в Мировом океане (1965 событий за период с 1628 г. д.н.э. до 2006 г.). Размер кружочка пропорционален магнитуде соответствующего цунамигенного землетрясения, цвет соответствует типу события: красный – трансокеанские цунами (11), лиловый – региональные, приведшие к жертвам (223), голубые – все остальные (1731).

Рельеф дна расчетной области, использованной для предварительных расчетов трансформации волн цунами, порожденных удаленными относительно Дальневосточного побережья РФ потенциально опасными очагами цунамигенных землетрясений.

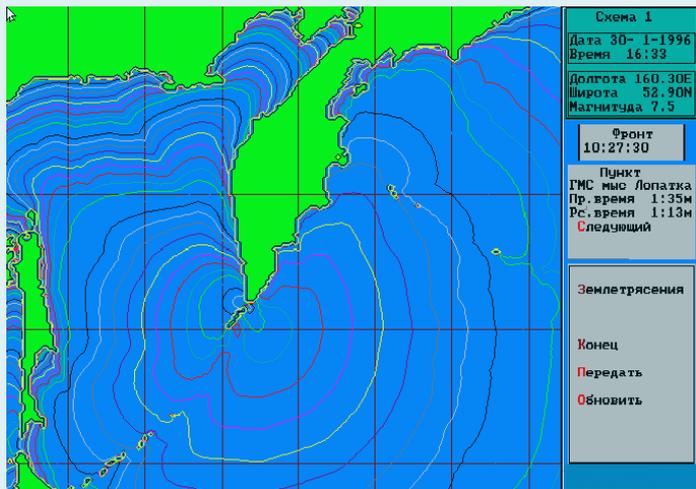


Совершенствование систем предупреждения о цунами

высокая точность даже на «грубой» сетке – 7 минут на час распространения волны



Совершенствование систем предупреждения о цунами



Создание подсистем ЕАСЦ, автоматизирующих деятельность персонала Служб предупреждения о цунами (Сахалин – версии 1, 2; Камчатка) контракты с ЦКБ ГМП (начало 90-х годов)

- # Оригинальная архитектура системы;
- # Использование распределенных информационно-вычислительных ресурсов;
- # Формулировка и реализация алгоритмов «предварительного» и «оперативного» расчета,
- # Включение в систему перспективных решений, рассчитанных на технические возможности «завтрашнего» дня;

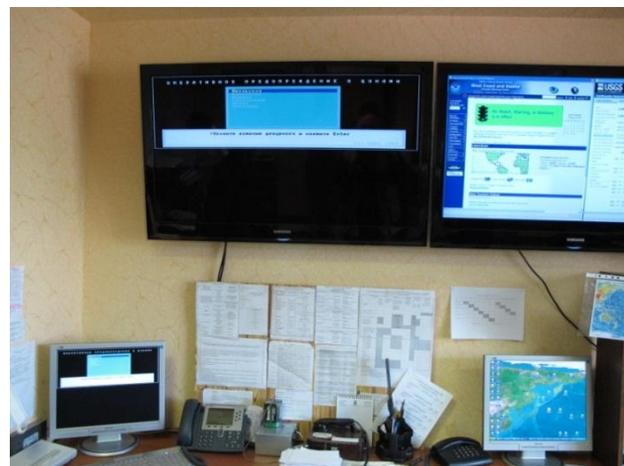
Date	Time	Warning Procedure 4	Travel Times
Greenwich	20-01-93 14:49	Severo-Kurilsk	7h 54m
		Matua	6h 43m
Sakhalin	21-01-93 01:49	Burevestnik	6h 32m
		Yuzhno-Kurilsk	6h 39m
		Malokurilskoe	6h 32m
		Urup	6h 37m
		Shumusu	7h 05m
		Simushir	6h 35m

Preliminary results

Duty oceanologist
Ivanov I. I.

N	Sakhalin	Date Time	Magnitude	Latitude	Longitude	Hypocentre Depth
12		19.03.1993	18:51	7.5	2.9N 170.3E	999

[F4] Verification [F9] Tide Calculations [F2] Save [Esc] Exit



Операционный зал Сахалинского центра цунами (июнь 2010 г.). Система на боевом дежурстве.



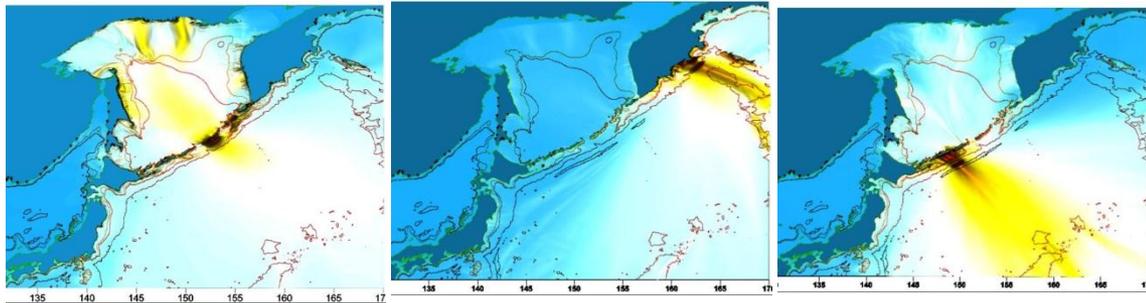
Совершенствование систем предупреждения о цунами

Создано программно-алгоритмическое вычислительное ядро, послужившее основой для

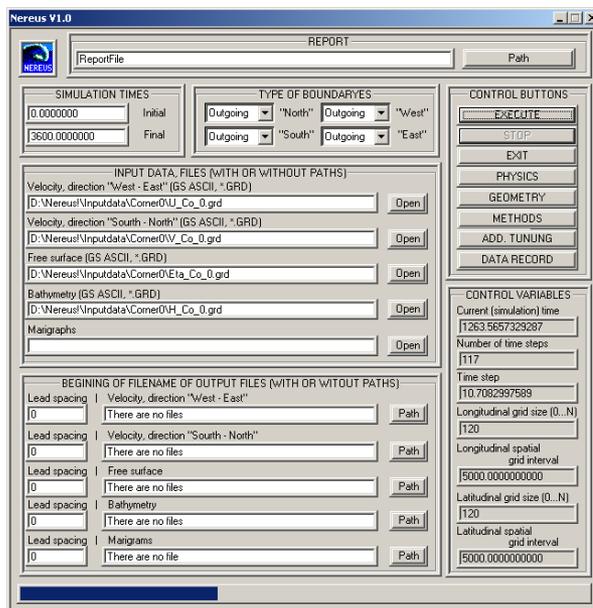
- исследовательского комплекса программ «Nereus»,

- комплекса программ для проведения серийных вычислительных экспериментов «MassGlobalCalcul»,

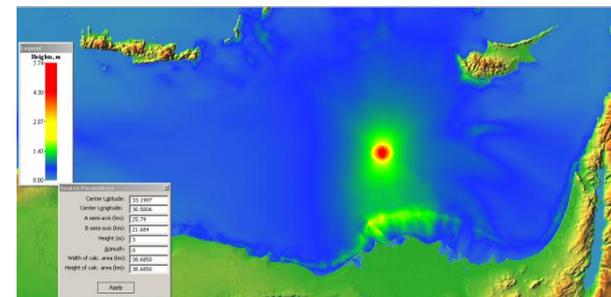
- вычислительных компонент информационно-вычислительных систем «WinITDB», «ITRIS».



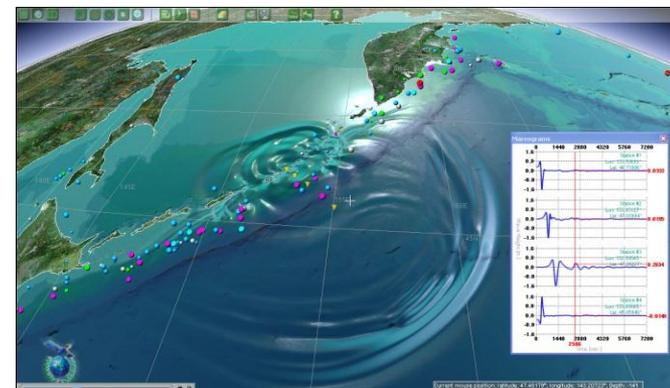
Результаты серийных расчетов с помощью комплекса «MassGlobalCalcul»



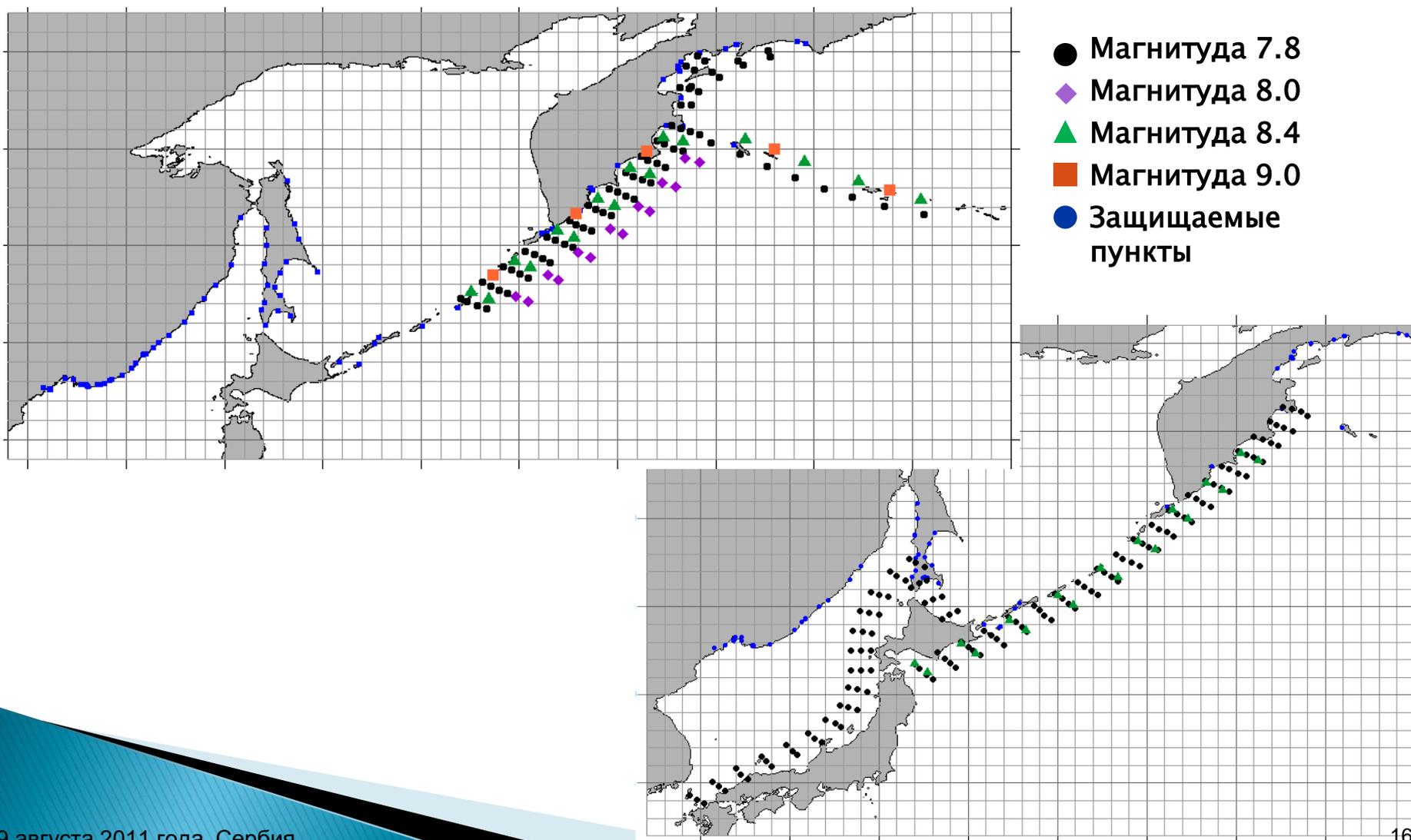
Рабочее окно программы «Nereus»

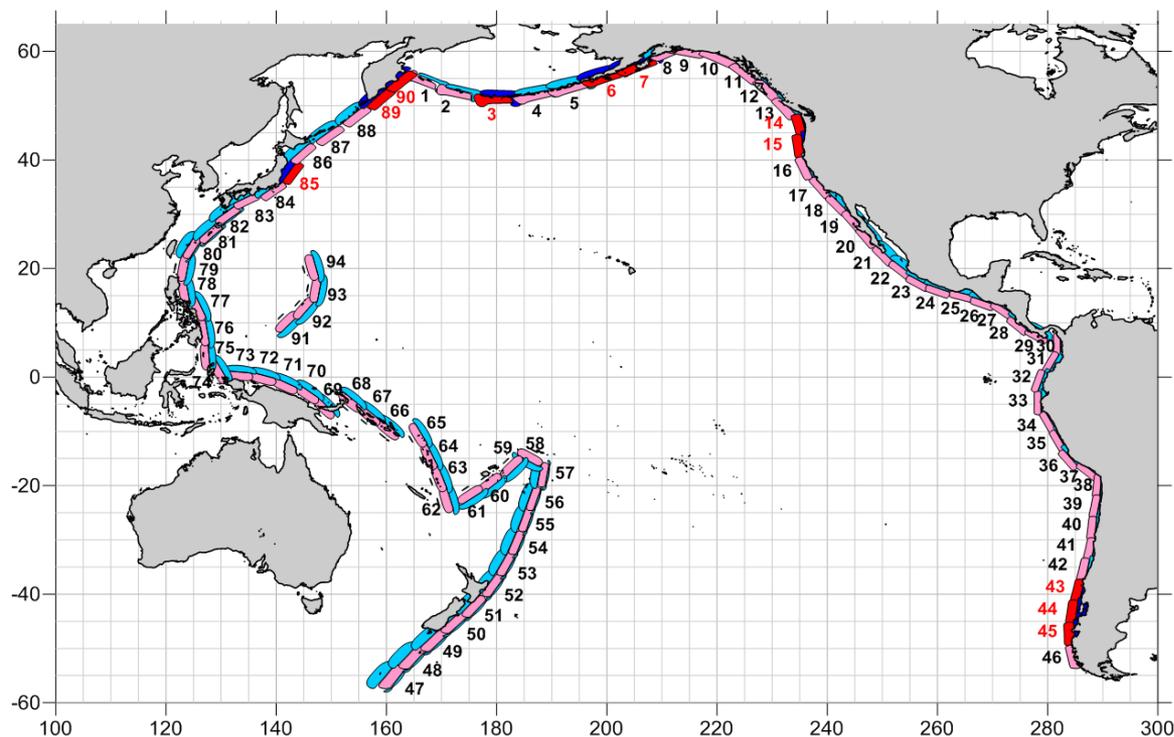


Моделирование цунами средствами системы «WinITDB»



Моделирование цунами в системе «ITRIS» 15

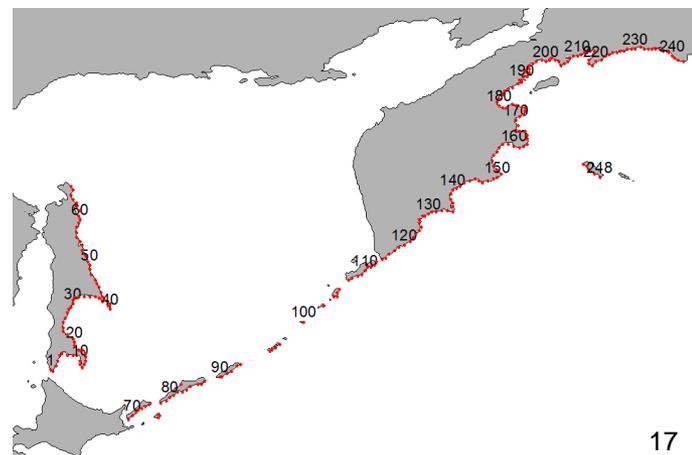


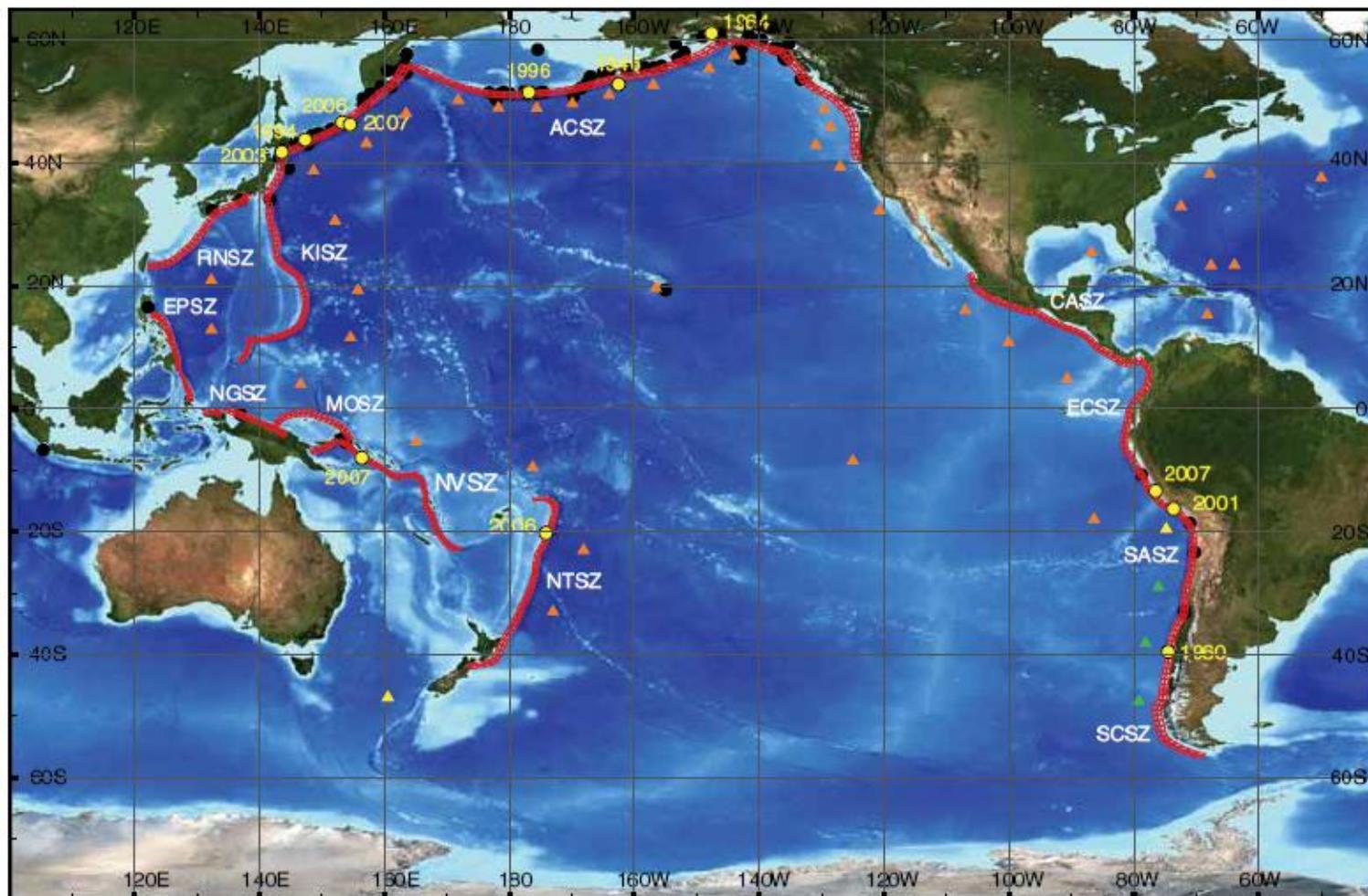


Виртуальные мареографы вдоль защищаемого побережья: восточное побережье о-ва Сахалин, Курильских островов, п-ва Камчатка ●

Система модельных цунамигенных землетрясений с магнитудой 9.0

- *Алеуто-Аляскинская группа (1a – 8a),*
- Североамериканская группа (9a – 22a),
- Центральноамериканская группа (23a – 29a),
- Южноамериканская группа (30a – 46a),
- группа Новой Зеландии – Тонга (47a – 57a),
- группа Папуа-Новой Гвинеи – Соломоновых островов (58a – 74a),
- Филиппинская группа (75a – 86a),
- *Курило-Камчатская группа (87a – 90a),*
- Группа Гуама (91a – 94a).



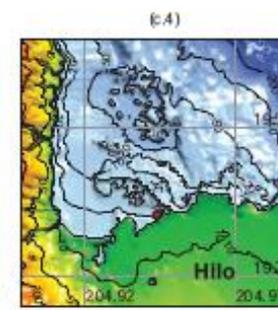
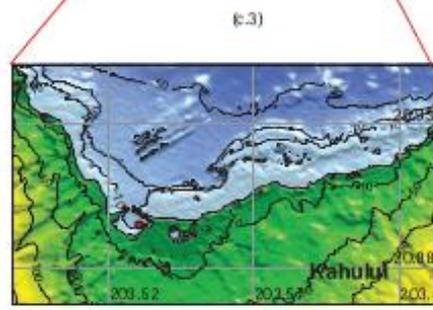
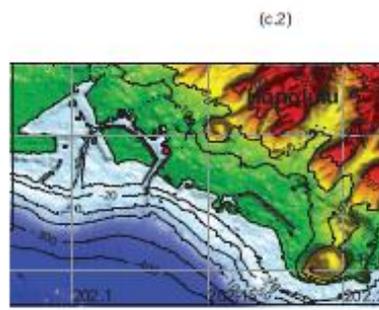
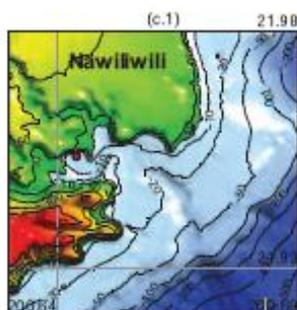
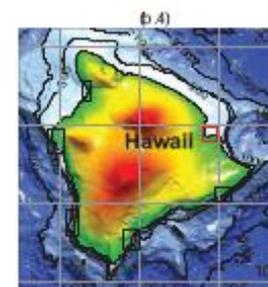
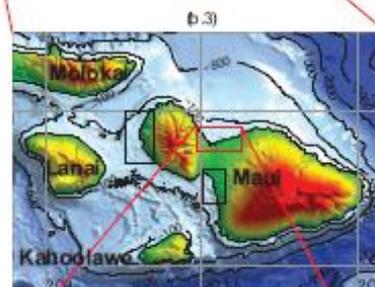
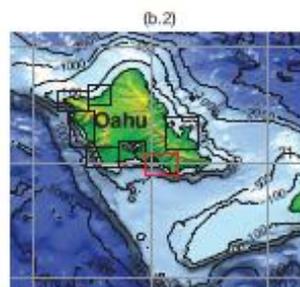
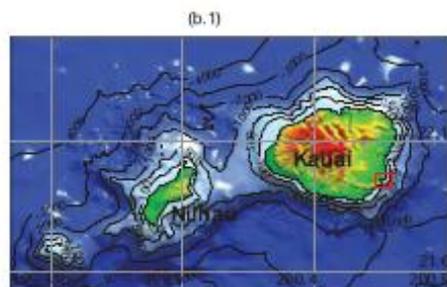


Американская система очагов в Тихом океане включает 899 базовых источников магнитудой 7.5.

Figure 2: Significant tsunami events of the last century in the Pacific. Black dots = epicenter locations of the earthquakes; Yellow circles = significant tsunami events used for validation in this study; Red blocks = SIFT unit source in the Pacific; Orange triangles = U.S. tsunameters; Green triangles = U.S. tsunameters in plan; Yellow triangles = non-U.S. tsunameters.

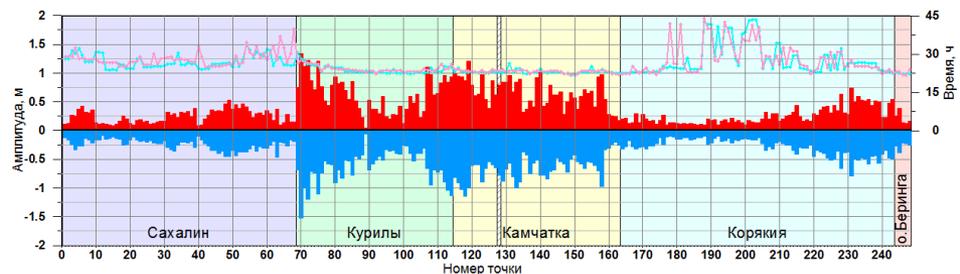
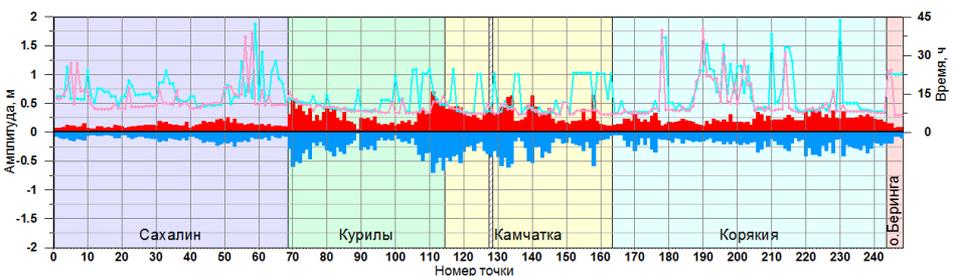
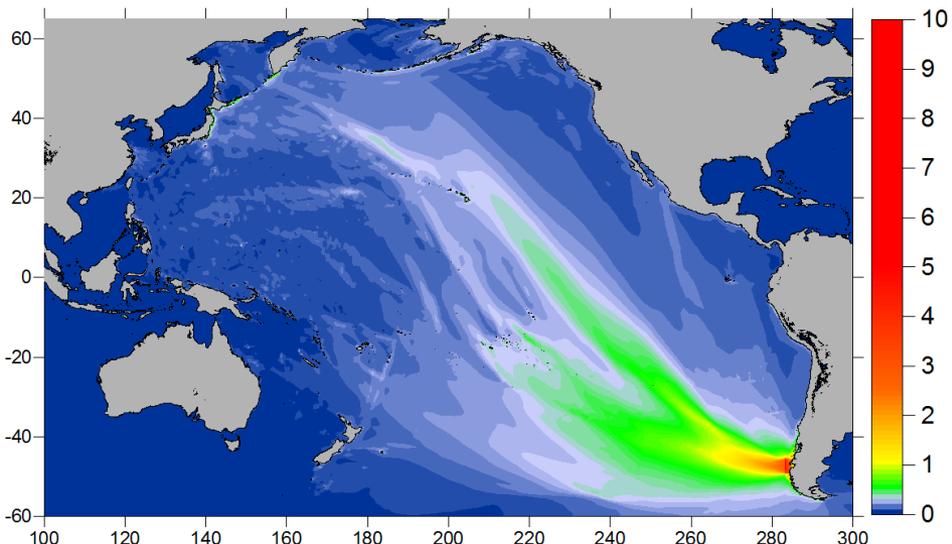
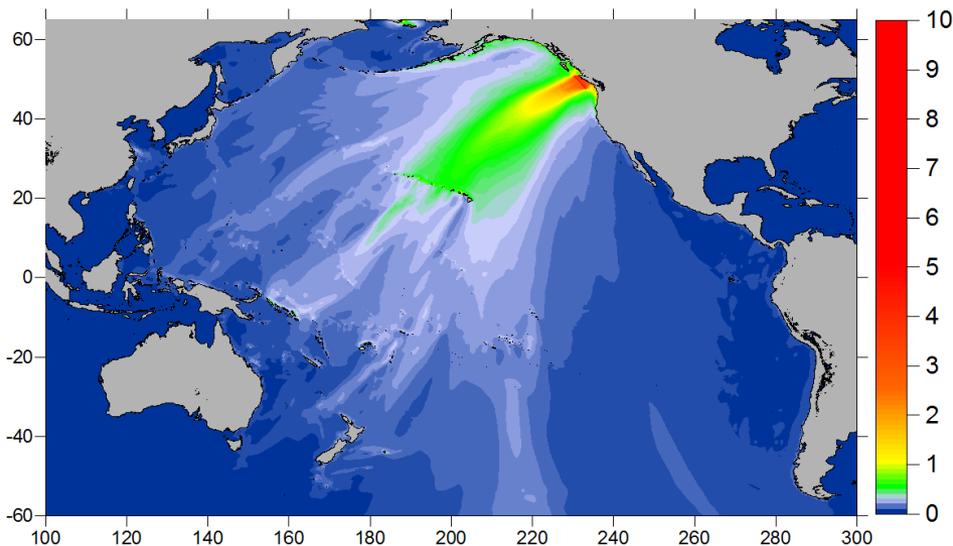


Для каждого защищаемого пункта расчет наката волн производится отдельно, на наборе из трех вложенных сеток – региональной (regional), прибрежной (coastal) и береговой (nearshore).
 Размерность самой мелкой береговой сетки для отдельных защищаемых пунктов доходит до 1/3 угловой секунды (~10 метров).

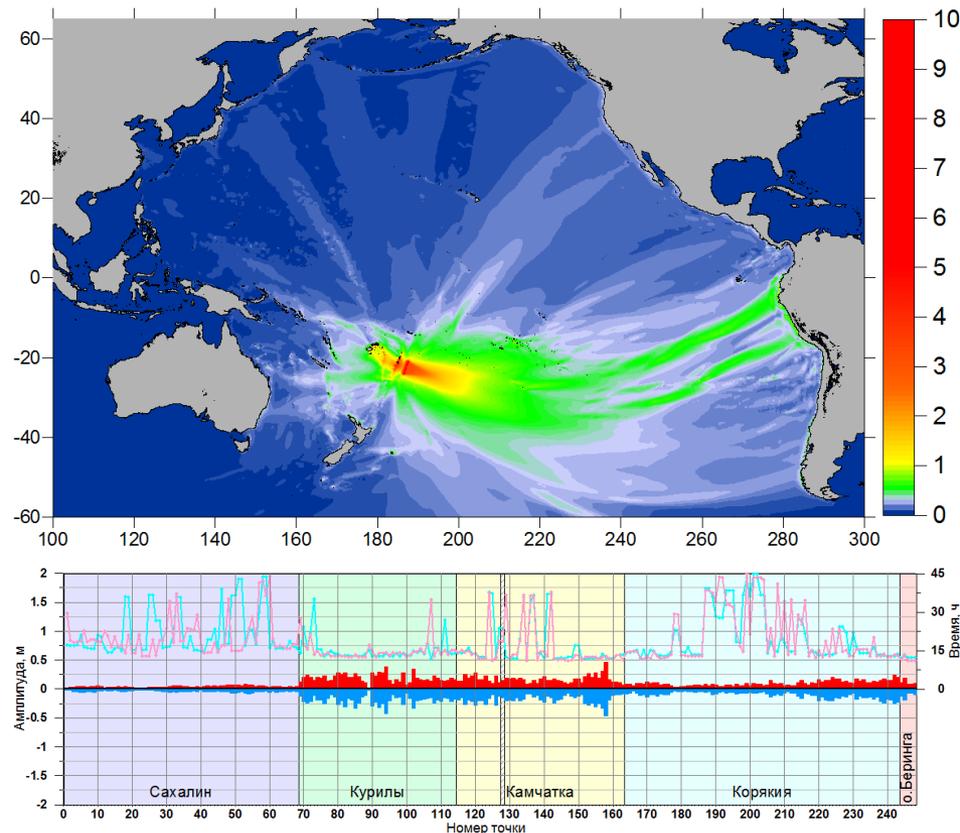




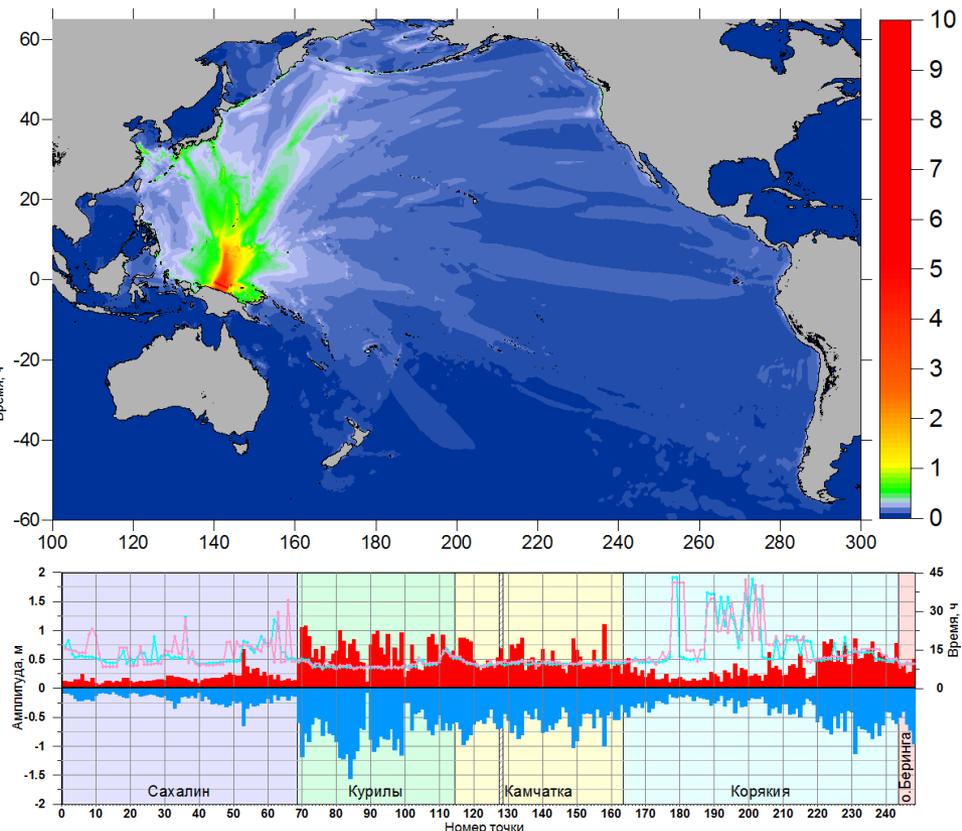
Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «13а», входящим в Североамериканскую сейсмическую зону. Исторический аналог - «Cascadia; 1700»



Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «45а», входящим в Южноамериканскую (Чили) сейсмическую зону. Исторические аналоги – «Chile; 1960, 2010»



Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «56а», входящим в Североамериканскую зону «Новая Зеландия – Тонга».

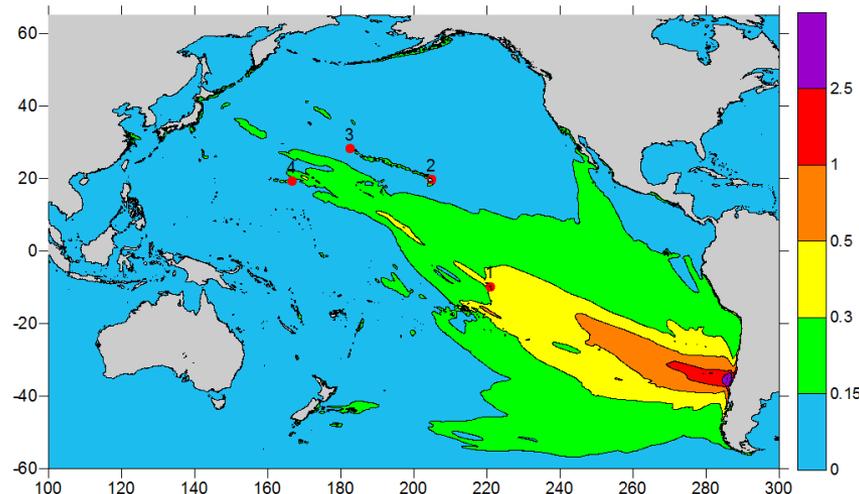


Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «71а», входящим в сейсмическую зону «Папуа-Новая Гвинея – Соломоновы острова».



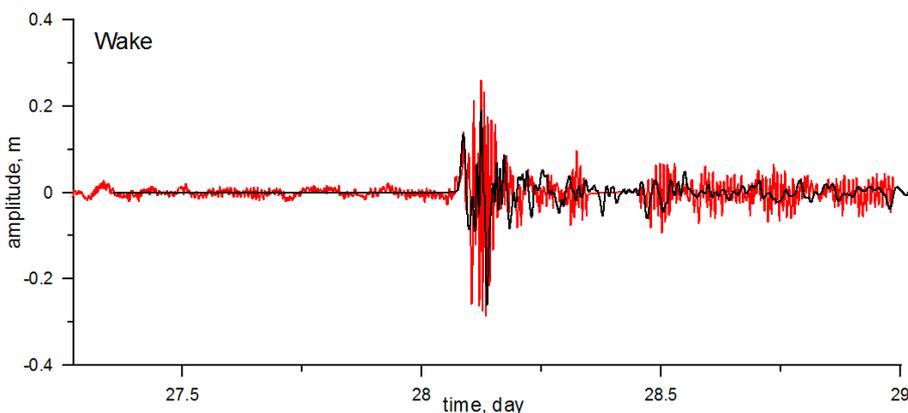
Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «42а», входящим в Южноамериканскую (Чили) сейсмическую зону.

Красными кружочками отмечены мареографные пункты Hiva (1), Hilo (2), Midway (3) и Wake (4).

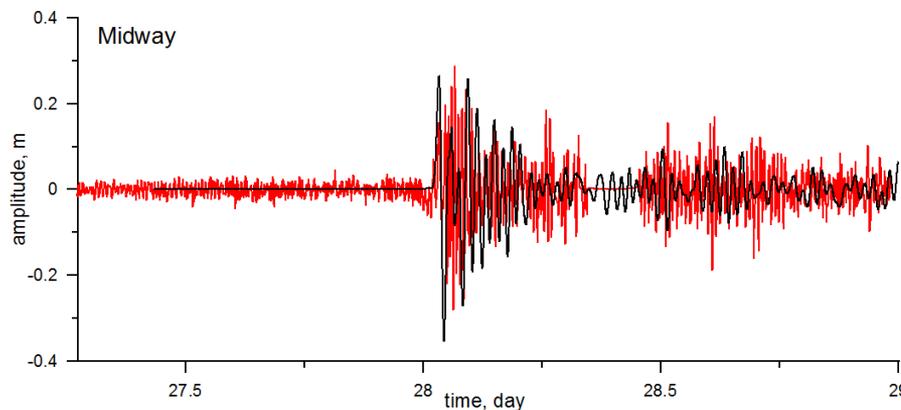


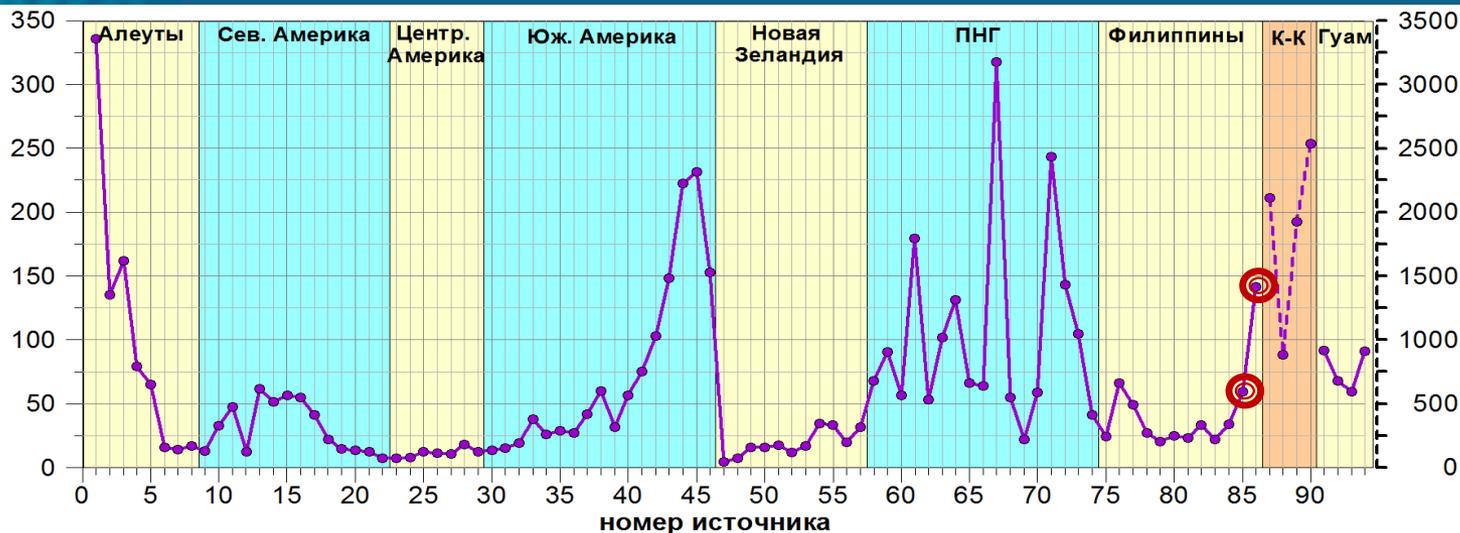
Сравнение расчетной (черная кривая, модельный очаг «42а») и реальной (красная, чилийское 2010 г. цунами, порожденное сейсмическим очагом с магнитудой $M_w = 8.8$) мареограмм для мареографного пункта Midway (3).

Глубина под виртуальным мареографом – 531 м.

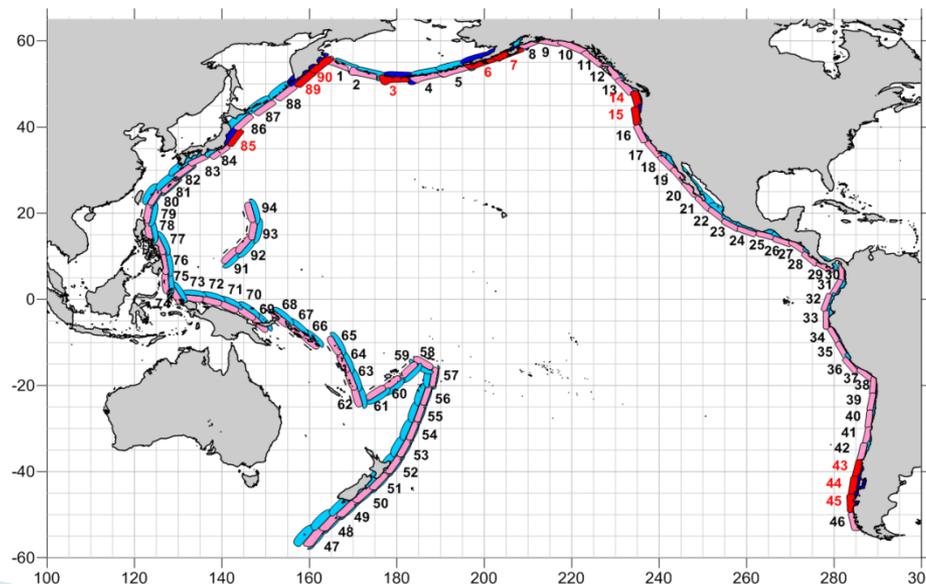


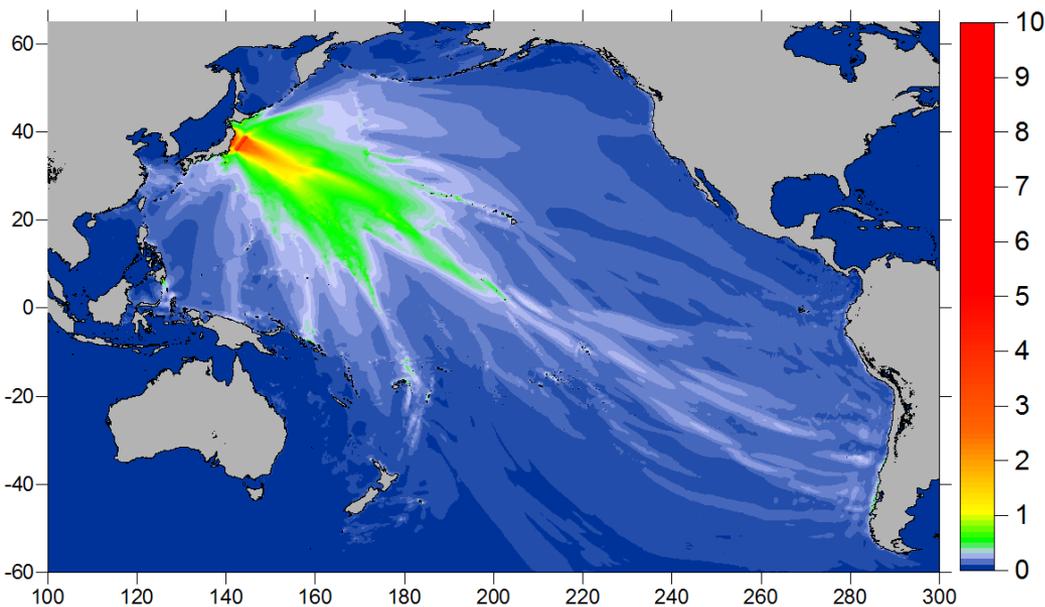
То же для мареографного пункта Wake (4).
Глубина под виртуальным мареографом – 1037 м.





Интегральная характеристика энергетического воздействия цунамигенных землетрясений на защищаемое Дальневосточное побережье России





Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенным землетрясением «85а», входящим в Филиппинскую сейсмическую зону.

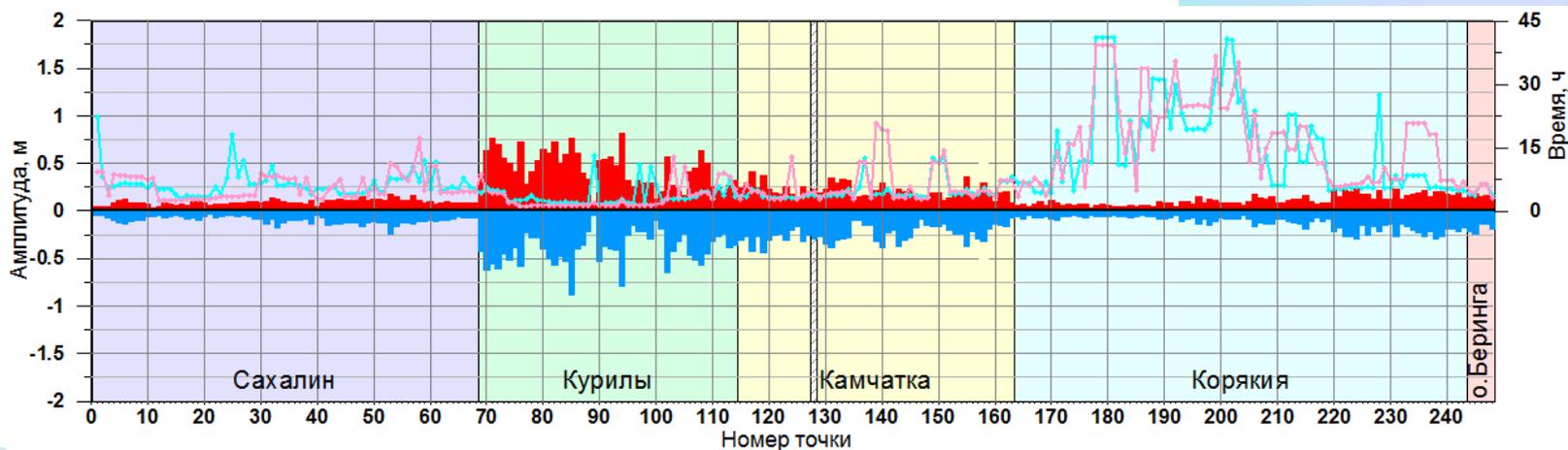
Исторический аналог «Sendai - Tohoku; 2011»

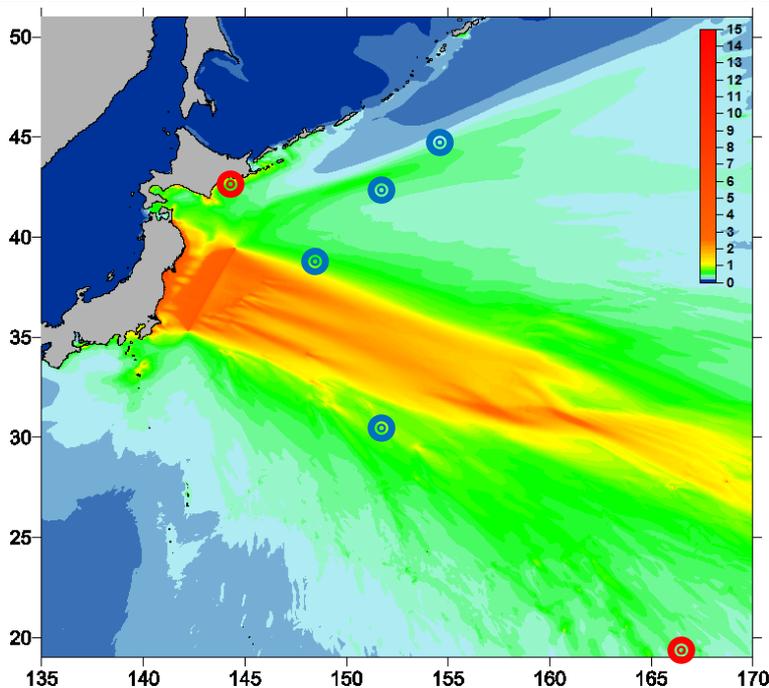
Источник №85:

- магнитуда – 9.0
- долгота – 142.2
- широта – 37.9

Реальный источник:

- магнитуда – 9.0
- долгота – 141.5
- широта – 38.0

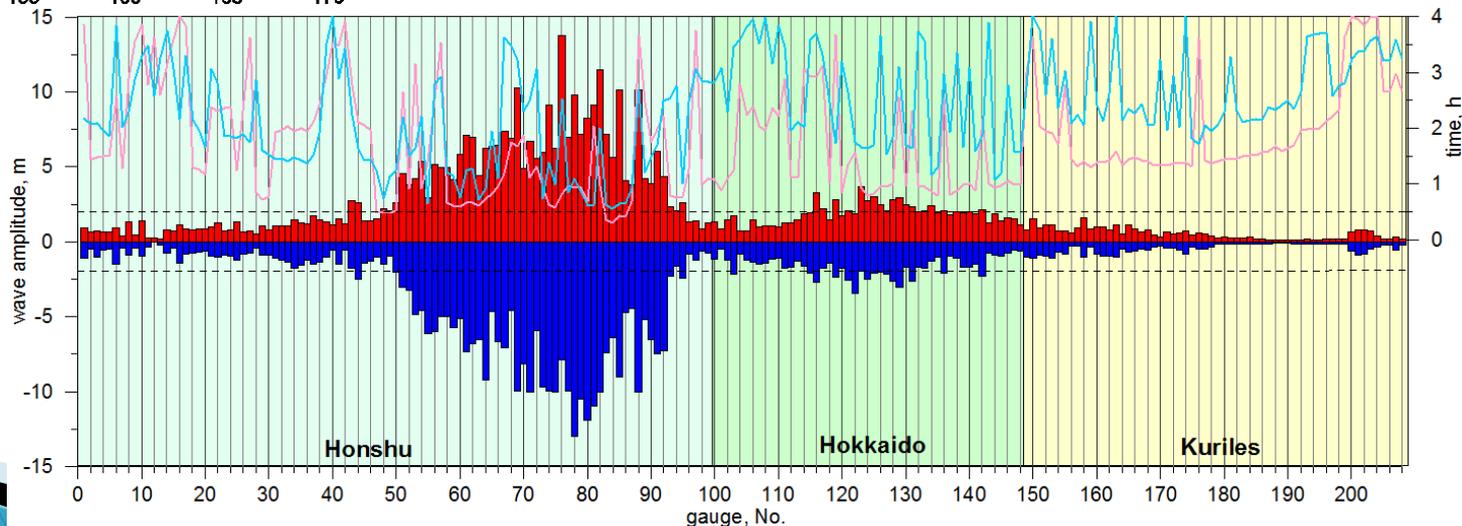




Реальный источник:

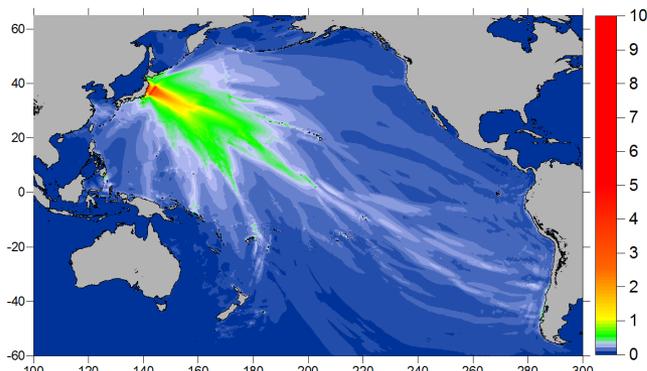
- магнитуда – 9.0
- долгота – 141.5
- широта – 38.0

LOCATION	LAT	LON	OBS	COMP
HANASAKI	43.3N	145.6E	1.83M	1.72M
WAKE	19.3N	166.6E	0.39M	0.39M
DART 21419	44.5N	155.7E	0.40M	0.37M
DART 21413	30.5N	152.1E	0.76M	0.85M
DART 21401	42.6N	152.6E	0.67M	0.37M
DART 21418	38.7N	148.7E	1.08M	0.62M



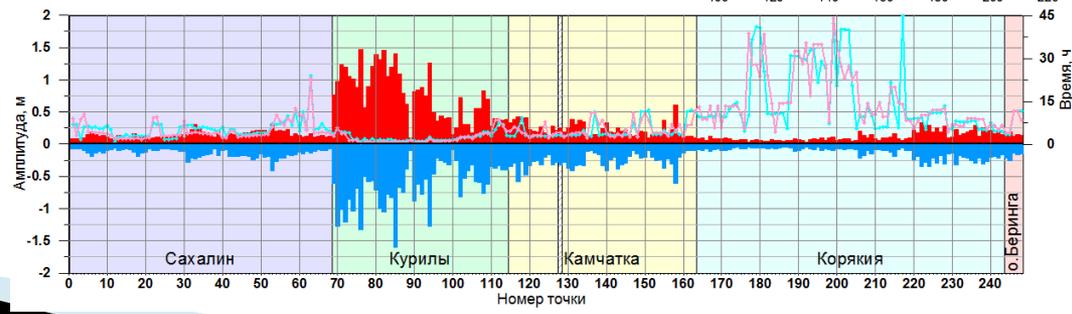
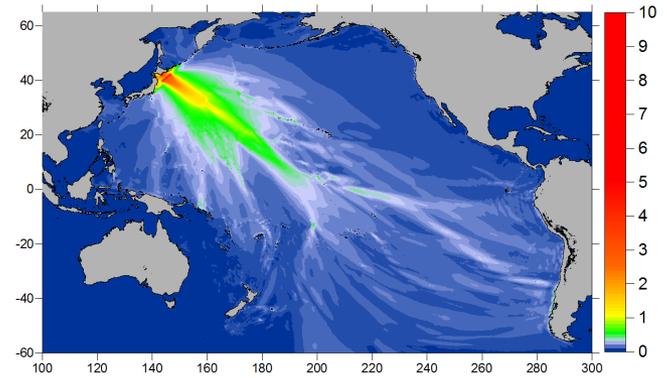
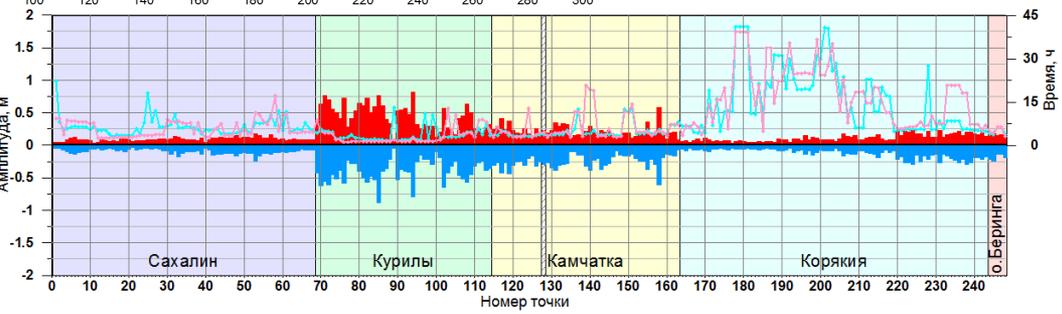
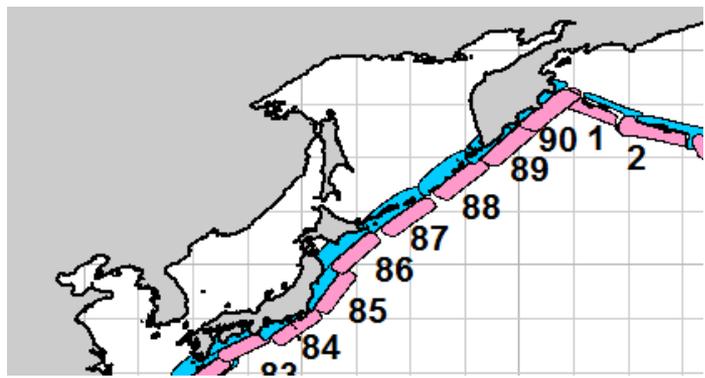


Распределение максимальных высот волн цунами, порожденных цунамигенными землетрясениями «85а» и «86а», входящими в Филиппинскую сейсмическую зону.



Источник №85:

- магнитуда – 9.0
- долгота – 142.2
- широта – 37.9



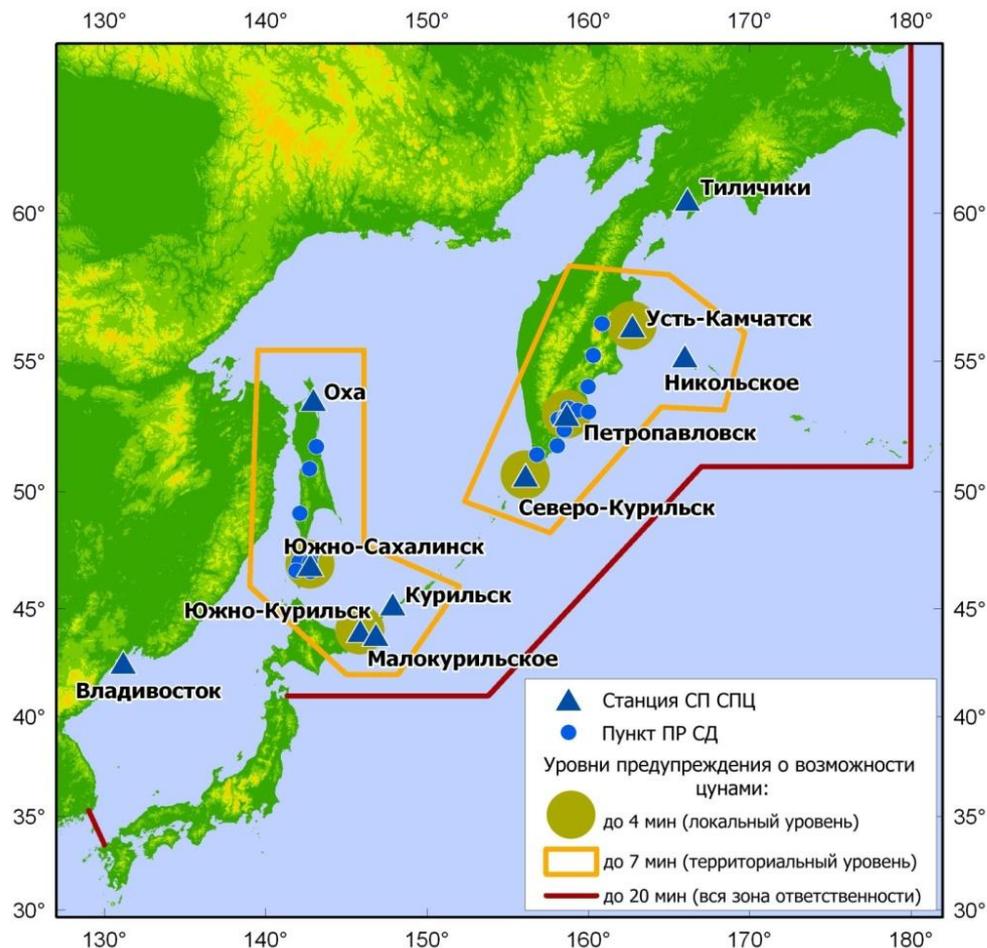
Источник №86:

- магнитуда – 9.0
- долгота – 142.2
- широта – 37.9

富嶽三十六景 神奈川沖
浪裏

浪裏



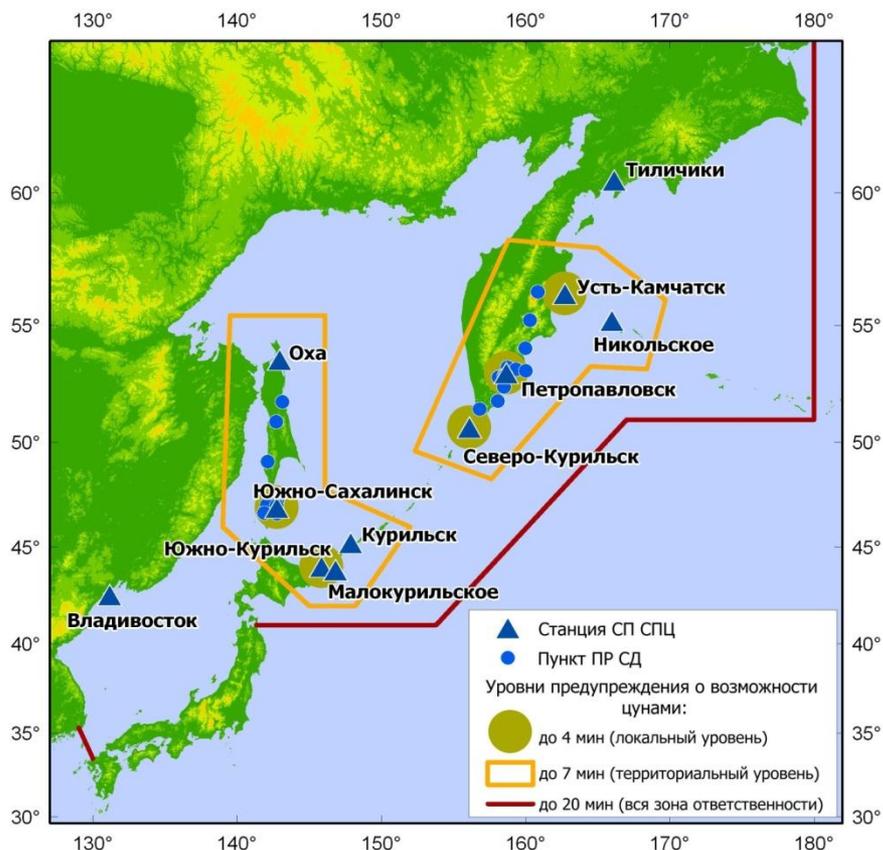


Зона ответственности СП СПЦ и уровни предупреждения о возможности цунами

Сейсмическая подсистема СПЦ **нового поколения** включает в себя:

- 5 опорных (ОЦС) специализированных сейсмических станций,
- 6 вспомогательных специализированных сейсмических станций (ВЦС),
- 16 пунктов регистрации сильных движений (ПР СД),
- региональных информационно-обрабатывающих центра (РИОЦ) Геофизической службы РАН, оснащенные спутниковой коммуникационной системой.

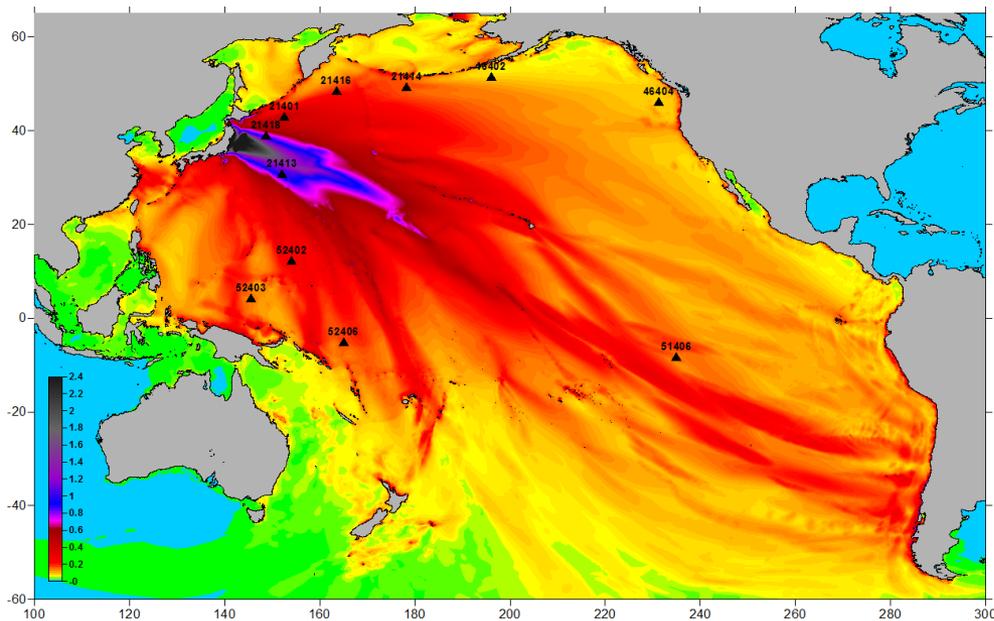
директор Камчатского филиала ГС РАН В.Н. Чебров:
Предложения к регламентам СП СПЦ



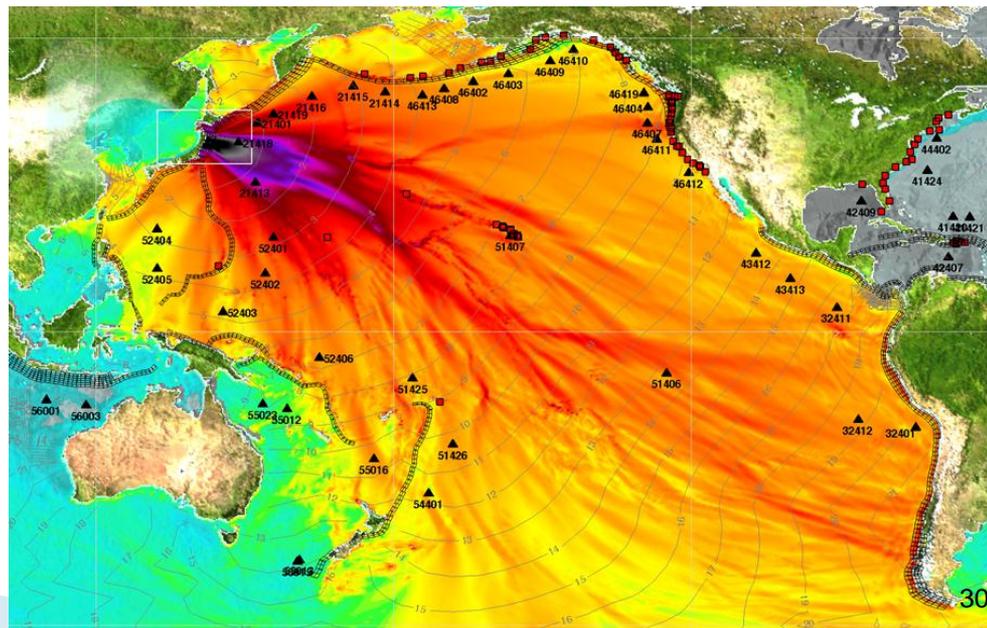
Зона ответственности СП СПЦ и уровни предупреждения о возможности цунами

Три уровня задержки предупреждения (сигналов) о возможности цунами:

- **до 4 минут** - **населенный пункт** или **участок побережья, защищаемый сейсмической группой опорной станции СП СПЦ** (локальный уровень) - передача сообщения о возможности цунами в защищаемом пункте или на участке побережья **по интенсивности сотрясений** с оценкой вероятности в зависимости от величины сейсмических воздействий;
- **до 7 минут** - **участки цунамиопасных побережий, сопряженные с сейсмоактивными зонами, которые контролируются сетью станций СП СПЦ** на эпицентральной расстоянии **до 200 км** - передача сообщения о возможности цунами **по оценкам параметров землетрясений** в соответствии с магнитудно-географическим критерием в пунктах на защищаемых участках в расчетной зоне в зависимости от эпицентра землетрясения и его магнитуды;
- **до 20 минут** – **по всей зоне ответственности СП СПЦ** для землетрясений с эпицентральными расстояниями **более 200 км** - передача сообщения о возможности цунами на защищаемой территории **по оценкам параметров землетрясений** в соответствии с магнитудно-географическим критерием.



• ИВТ СО РАН, Россия

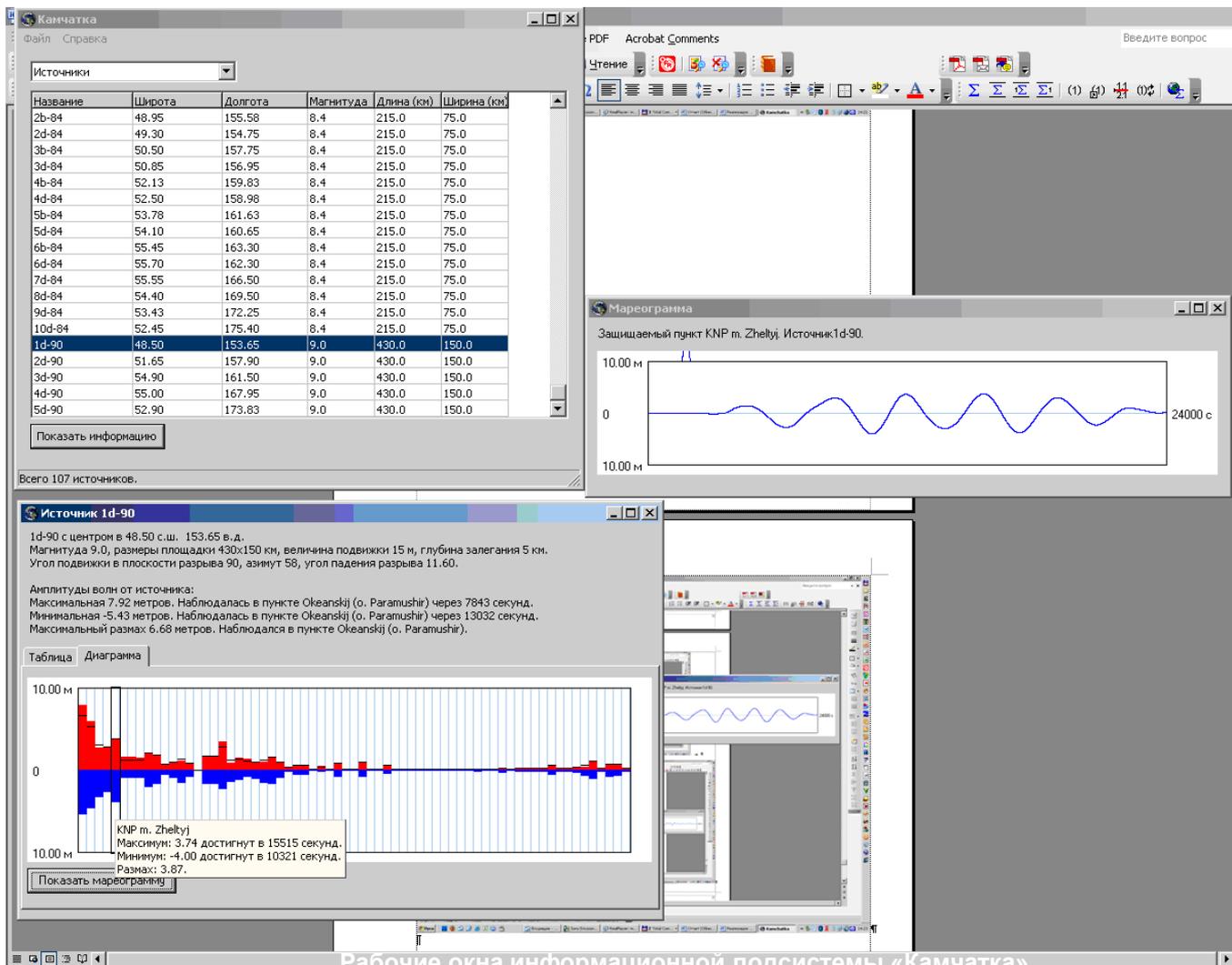


• NOAA, USA



Совершенствование систем предупреждения о цунами

Предложена и реализована для Дальневосточного побережья РФ методика разработки баз данных о проявлении волн цунами для защищаемых пунктов побережья, предназначенных для информационного обеспечения экспертных оценок динамического воздействия волн цунами, выполняемых региональными фрагментами национальных систем предупреждения о цунами.



Рабочие окна информационной подсистемы «Камчатка»



ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ И ЦУНАМИ

11 марта 2011 года в **05:46 GMT (14:46 JST)** вблизи восточного побережье о-ва Хонсю произошло подводное землетрясение с магнитудой **Mw=9.0**
Энергия землетрясения - **3.9×10^{22} Дж** (9.3 Тераватт-час или 186500 50Мт бомб, также равна энергии падения 1.2-км астероида)

Погибших **12157 чел**

Пропавших без вести **15496 чел**

Всего **27653 чел** (1896 год – 27122 чел)

Раненых **5000 чел**

Эвакуированных **223000 чел**

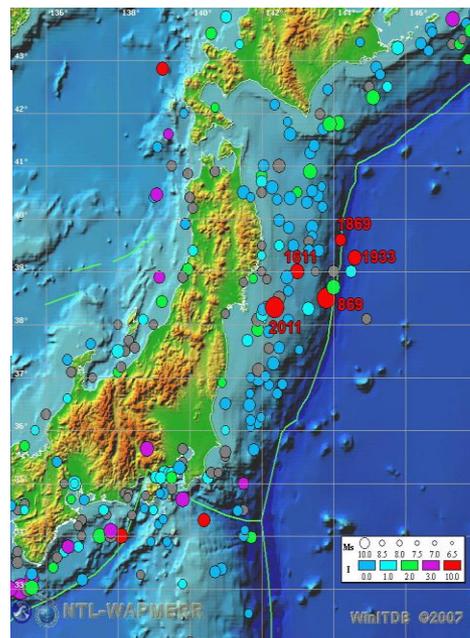
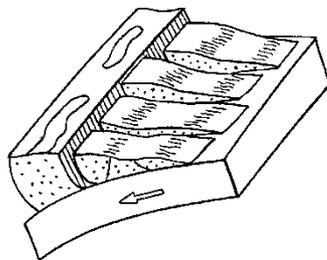
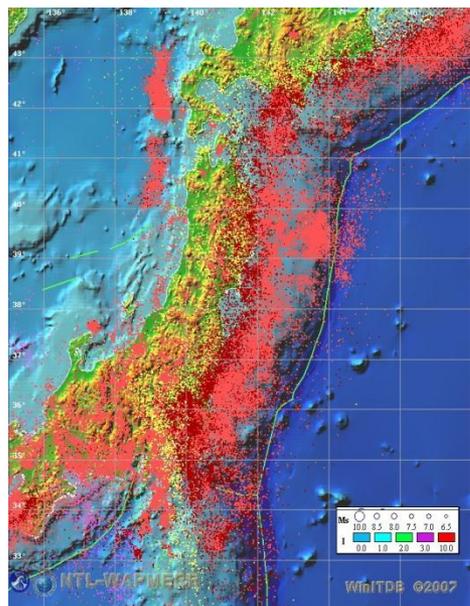
Материальный ущерб **250 млрд. долл** (Кобэ 1995 год – 95 млрд. долл.)

Максимальная высота цунами **25.5м** (на 4.04.11)

Тревога цунами была объявлена по всему бассейну Тихого океана

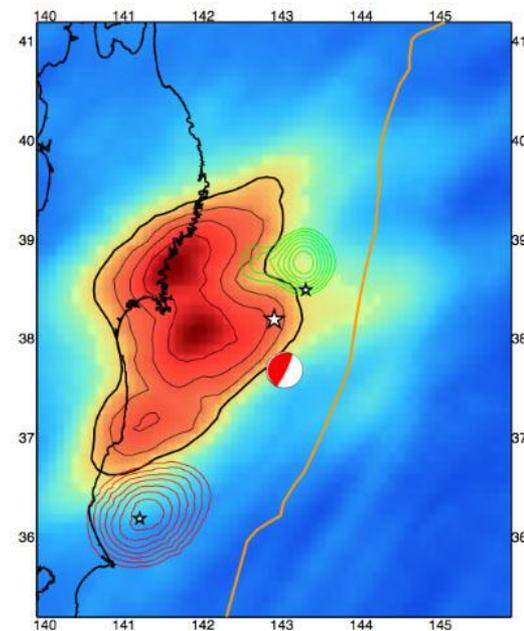
Цунами вызвало тяжелую аварию на атомной станции Фукусима-I

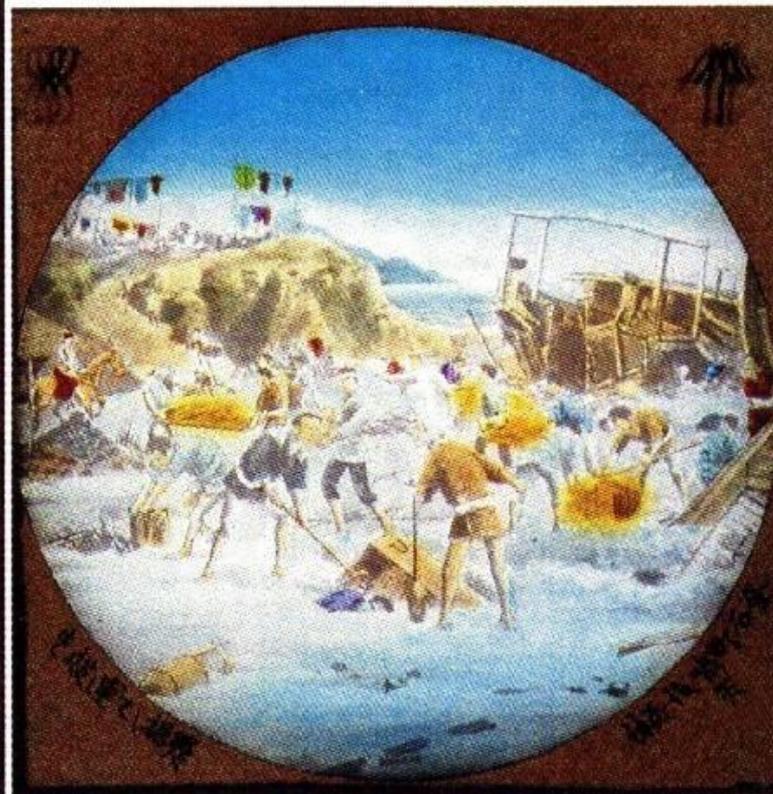
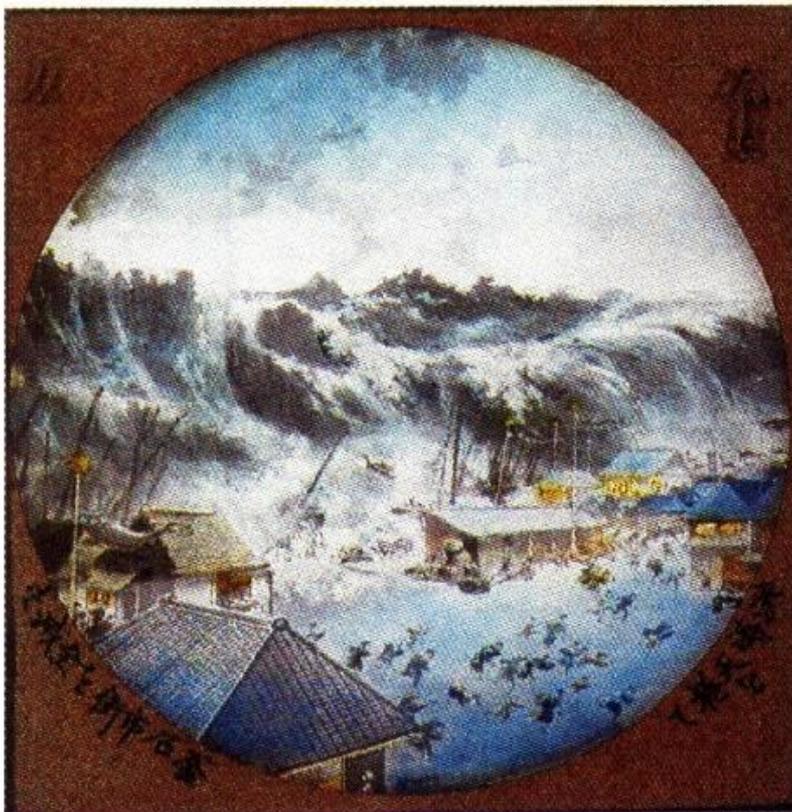




Очаги цунамигенных землетрясений

Карта сейсмичности





1896 Meiji Great Sanriku tsunami $H_{max}=38m$ Fatalities= 27122
On right, people recovering bodies and debris from sand

1933 Showa Great Sanriku tsunami $H_{max}=28m$ Fatalities =3064



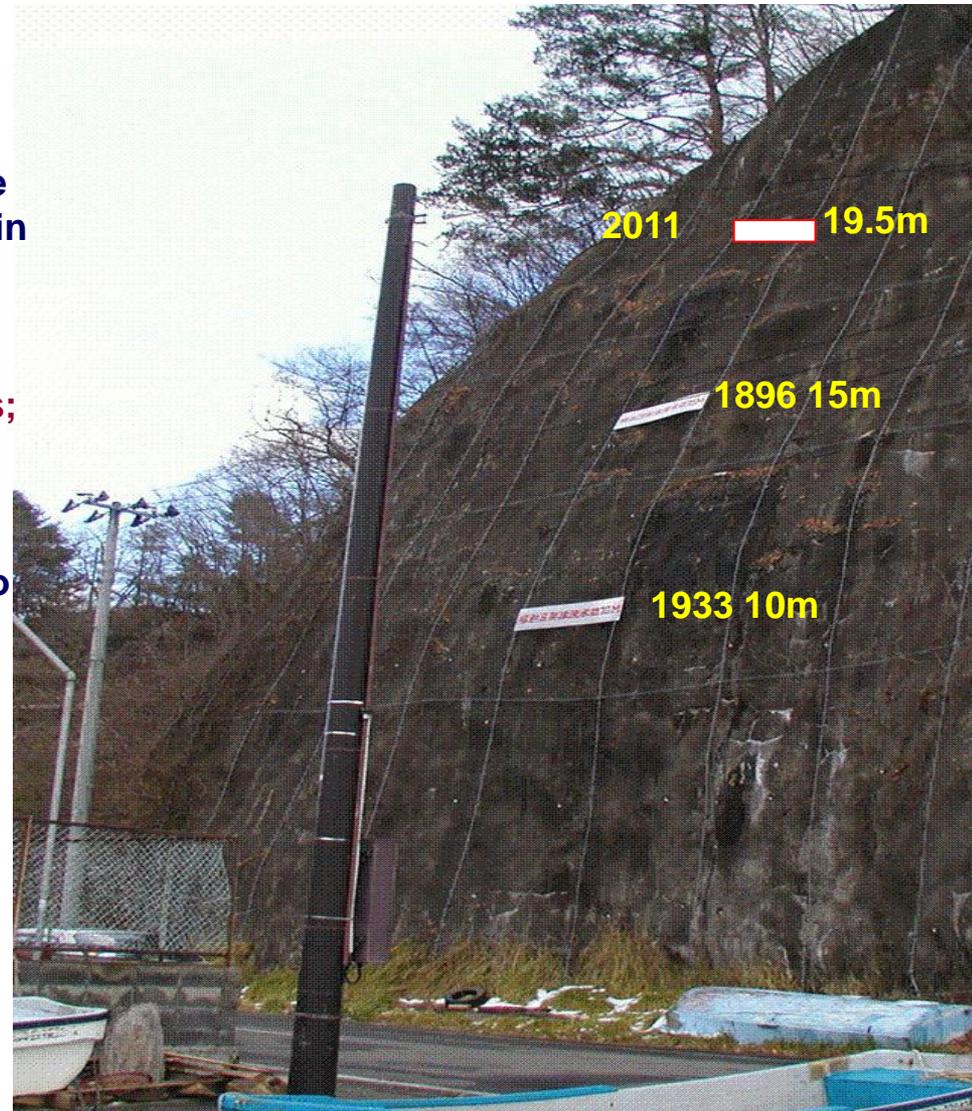
Tarou has been attacked historically by several tsunamis. In case of 1896 tsunami, 1,859 persons out of 3,600 populations were killed.

Also 911 people were killed by 1933 tsunami. In order to protect the tsunami, several seawalls have been constructed. The 1st seawall was completed in 1940, and last seawall was completed in 1978. In case of 1960 Chilean tsunami, there was no causality in Tarou.

The specification of the Tarou seawall is as follows;
 Height of the seawall: 10.7 m, width of the seawall basement: 25 m, width of the upper seawall: 3 m, total length: 2,433 m

Tarou has developed not only the seawalls but also prepared evacuation routes, signage, modification of roads for the safety and quick evacuation.

The debris trace can be seen on the same cliff; showing the height 1896 (15 m) and 1933 (10 m) tsunamis, at the height of 19.5 m. The run-up heights in other place were 25.5 m and 24.7 m. The detail tsunami disaster information from this tsunami is not available as of now.





被災前(昭和52年10月撮影)



被災後(平成23年3月13日撮影)



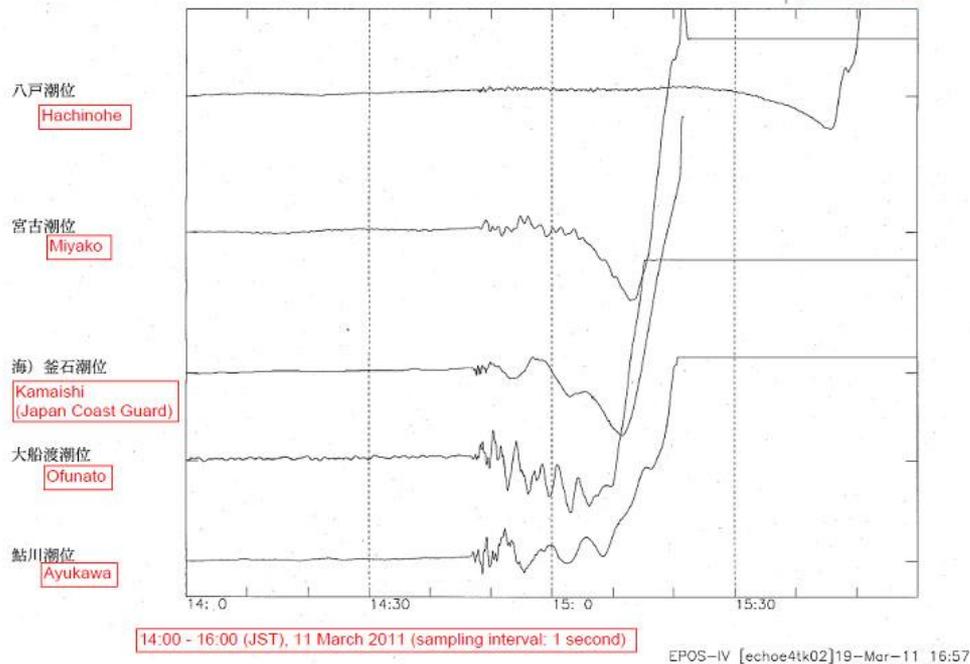
Таро-таун, префектура Мияги



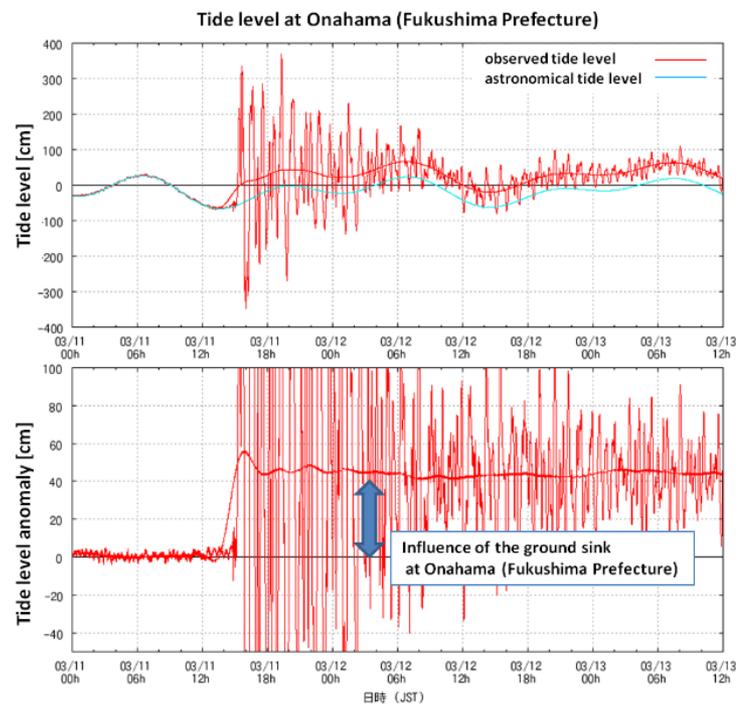
気象庁潮位 1 (直送・潮位計・秒値) (検潮所名)

< 2011/ 3/11 14: 0 -- 2011/ 3/11 16: 0 >

1000 mm
Scale: 1 meter



Записи береговых мареографов на восточном побережье Хонсю



Запись берегового мареографа в Онахама, префектура Фукусима