

## **РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ**

*Чебров В.Н.<sup>1</sup>, Гусев А.А.<sup>1,2</sup>, Гусяков В.К.<sup>3</sup>, Чебров Д.В.<sup>1</sup>, Абубакиров И.Р.<sup>1</sup>, Павлов В.М.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, [chebr@emsd.ru](mailto:chebr@emsd.ru)*

*<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

*<sup>3</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

### **Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России**

**30 сентября - 4 октября 2013 г.  
г. Петропавловск-Камчатский**

**Работа выполняется в рамках ФЦП «Снижение рисков ... до 2015 года»**

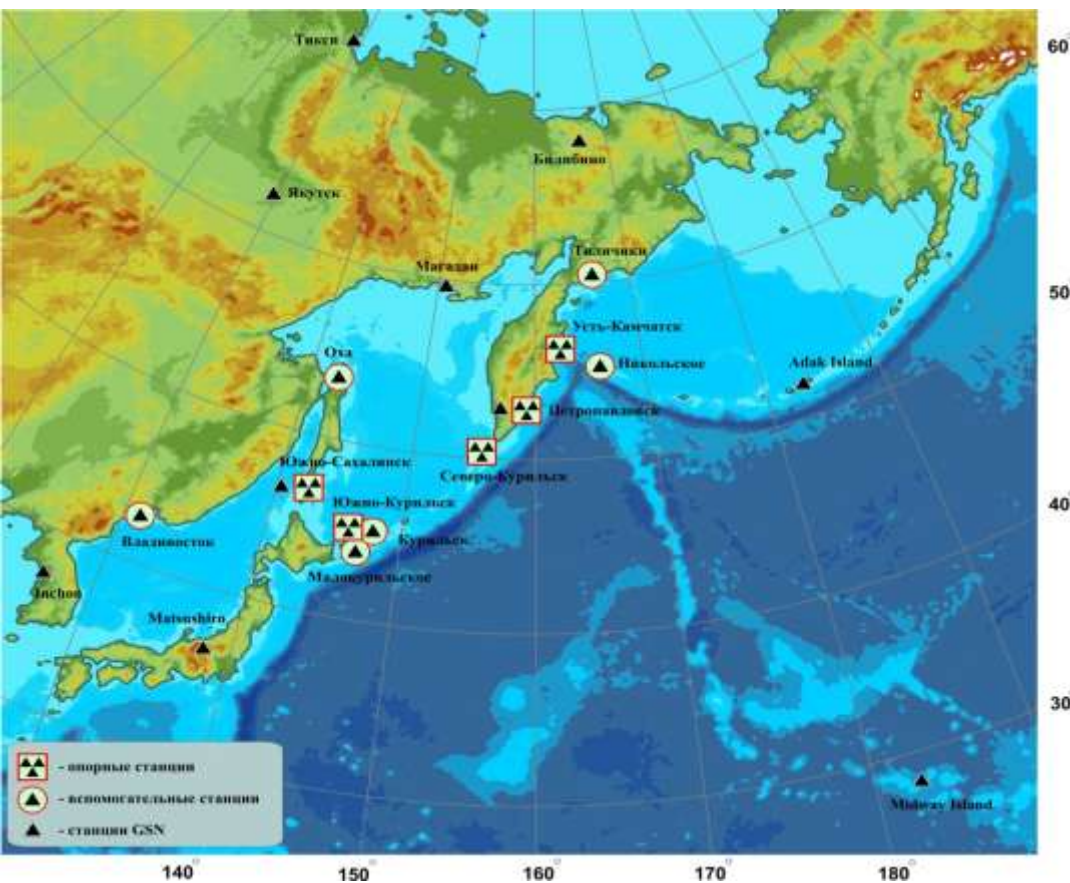
*Государственный контракт № 74-ОК/11-9 от 16 ноября 2011 г.*

**Исполнитель:** *Геофизическая служба РАН, Камчатский филиал ([www.emsd.ru](http://www.emsd.ru))*

**Соисполнители:** *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,  
г. Южно-Сахалинск*

**Сроки НИР:** *2011 – 2015 гг.*

**В 2006–2010 гг. Геофизической службой РАН в рамках ФЦП “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.” была разработана и создана система сейсмологических наблюдений для СПЦ нового поколения - сейсмическая подсистема СПЦ (СП СПЦ).**



**Однако, несмотря на достигнутый высокий уровень автоматизации, используемые методические основы выработки прогноза цунами остаются теми же, что и пятьдесят лет назад, т.е. опасность цунами прогнозируется фактически по единственному критерию - величине магнитуды землетрясения.**

**При таком подходе оправдываемость тревог цунами составляет около 30 %. Это подтверждается итогами работы СПЦ на Дальнем Востоке России, а также на Аляске, Японии и других региональных служб предупреждения.**

**Целью работы является сокращение времени формирования сообщений об угрозе цунами, повышение достоверности принимаемых решений, снижение числа ложных тревог, снижение сейсмических рисков.**

**Основные задачи:**

**Исследования эффективности применения в СПЦ магнитудно-географического критерия по С.Л. Соловьеву, основных характеристик СП СПЦ на ДВ РФ по имеющимся результатам эксплуатации.**

**Разработка и обоснование требований к сейсмической составляющей функциональной подсистемы предупреждения о цунами единой системы в Дальневосточном регионе.**

**Изучение свойств (параметров) очагов цунамигенных землетрясений.**

**Разработка и создание алгоритмов функционирования, обработки сейсмологических данных и принятия решения о возможности цунами с оценкой вероятности для различных уровней тревоги, обеспечивающих сокращение времени формирования сообщений об угрозе цунами и снижение числа ложных тревог цунами для защищаемых населенных пунктов.**

**Разработка организационного обеспечения сейсмической составляющей функциональной подсистемы предупреждения о цунами, включая разработку, отладку и внедрение регламентов работы в службе предупреждения о цунами единой системы в Дальневосточном регионе.**

# **Основные результаты 2011-2013 гг.**

# Эффективность магнитудно-географического критерия С.Л. Соловьева [Гусяков, 2010]

## Результаты работы СПЦ на ДВ РФ в 1958–2009 гг.

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

Данные таблицы показывают, что общая эффективность службы, основанной на магнитудном принципе прогноза, остается низкой, в среднем, тревоги выпускаются только для 67% землетрясений с  $M \geq M_{\text{пор}}$ . Этот показатель, однако, существенно улучшился во второй половине анализируемого интервала (возрос с 57% до 85%). Оправдываемость тревог при этом практически не изменилась – по-прежнему, находится на уровне 25%, т.е. 75% выпущенных тревог оказываются ложными.

**N** – общее число землетрясений с  $M \geq M_{\text{пор}}$ ,

**T** – общее число цунами, наблюдавшихся на побережье РФ,

**T<sub>o</sub>** – число опасных цунами (с высотами  $H_{\text{max}} > 0.5$  м),

**W** – число тревог, поданных службой предупреждения,

**W<sub>o</sub>** – число оправдавшихся тревог (поданных перед опасными цунами),

а также соотношения между этими параметрами, характеризующие:

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

**W<sub>o</sub>/W** – оправдываемость тревог,

**T<sub>o</sub>/N** – ожидаемая эффективность прогноза,

**W<sub>o</sub>/T<sub>o</sub>** – коэффициент предупреждаемости опасных цунами.

## Эффективность магнитудного метода по Мировым данным (1958–2010)

$M_s$	$J \geq 0$			$J \geq 0.5$			$J \geq 1$		
	$P_n$	$P_o$	$F$	$P_n$	$P_o$	$F$	$P_n$	$P_o$	$F$
7	0.222	0.613	0.564	0.175	0.474	0.663	0.149	0.423	0.700
7.7	0.552	0.284	0.389	0.407	0.242	0.478	0.356	0.216	0.533
8	0.722	0.113	0.241	0.541	0.108	0.276	0.464	0.108	0.276

**Расчетная эффективность СПЦ, основанной на магнитудно-географическом критерии, в зависимости от пороговой магнитуды по мировым данным**

$P_n = N_n / N_{\text{ц}}$  – доля пропущенных цунами с интенсивностью  $J$  более либо равной заданной

$P_o = N_o / N_{\text{ц}}$  – предупреждаемость цунами: доля цунами с интенсивностью  $J$  более либо равной заданной, которые были предупреждены.

$F = N_{\text{л}} / N_{\text{тр}}$  – доля ложных тревог

**Получены параметры распределения расхождения оценок координат РИОЦ «Петропавловск» и РИОЦ «Южно-Сахалинск» между собой и другими сейсмическими агентствами по результатам работы в реальном времени.**

Сейсмическое агентство*	$[d\Delta]_{0.5}$	$dQ$	$[d\Delta]_{0.9}$	$[d\Delta]_{0.95}$	$N$
КАМ—NEIC	0.33	0.261	0.807	1.565	261
КАМ—OBN	0.296	0.303	0.926	1.628	165
SAKH—NEIC	0.414	0.42	1.078	1.594	120
SAKH—OBN	0.326	0.509	1.229	1.602	56
КАМ—SAKH	0.372	0.484	1.401	1.874	134

**Принятые сокращения:  
КАМ – РИОЦ «Петропавловск»; SAKH – РИОЦ «Южно-Сахалинск»; OBN – Служба срочных донесений ГС РАН (г. Обнинск); NEIC – National Earthquake Information Center, USA**

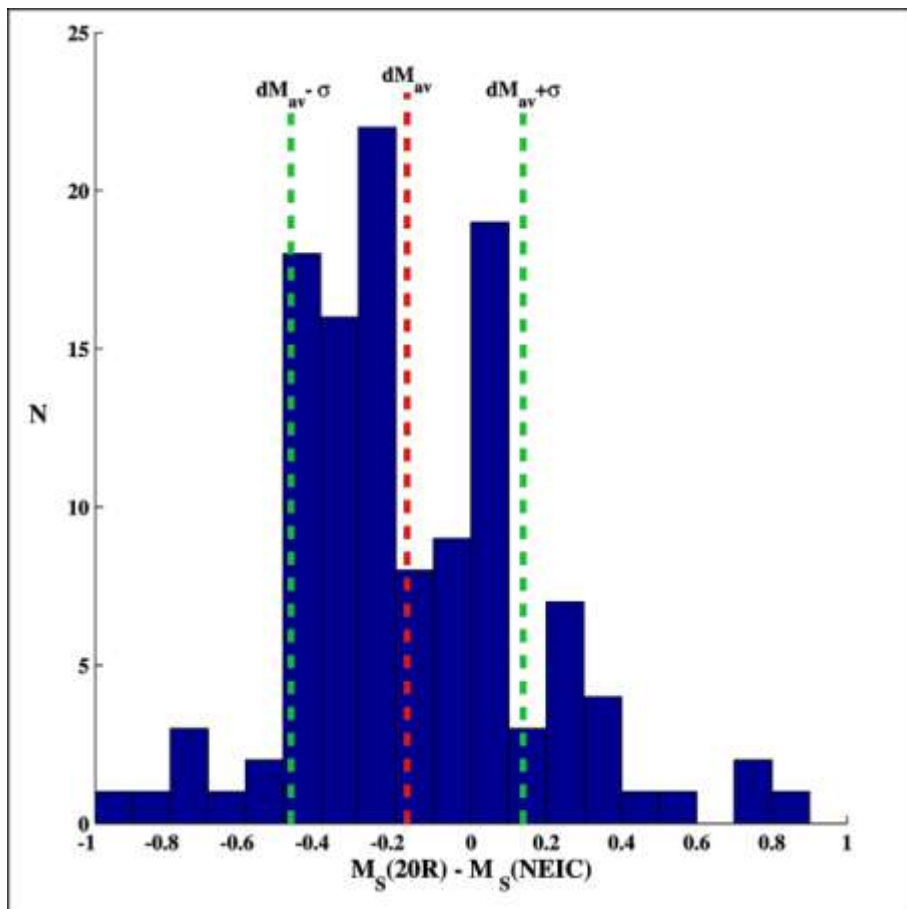
**Получены параметры распределения расхождения оценок магнитуд  $M_S$ , произведенных РИОЦ «Петропавловск» в оперативном режиме, и другими сейсмическими агентствами**

Сейсмическое агентство (шкала магнитуд)	$\overline{dM_S}$	$[dM_S]_{0.5}$		$[dM_S]_{0.05}$	$[dM_S]_{0.95}$	$dQ$	$N$
NEIC ( $M_S$ )	-0.258	-0.3	0.259	-0.6	0.1	0.3	128
ГС РАН ( $M_S$ )	-0.295	-0.3	0.27	-0.61	0.11	0.3	150
РИОЦ «Петропавловск» ( $M_S$ )	-0.186	-0.2	0.301	-0.63	0.33	0.4	185
РИОЦ «Южно-Сахалинск» ( $M_S$ )*	-0.275	-0.2	0.429	-0.855	0.4	0.4	60

\* – Параметры распределения  $M_S^{PET} - M_S^{YSS}$



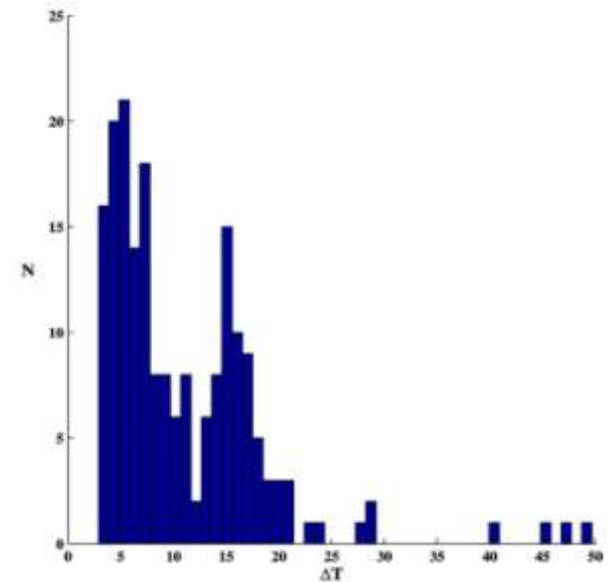
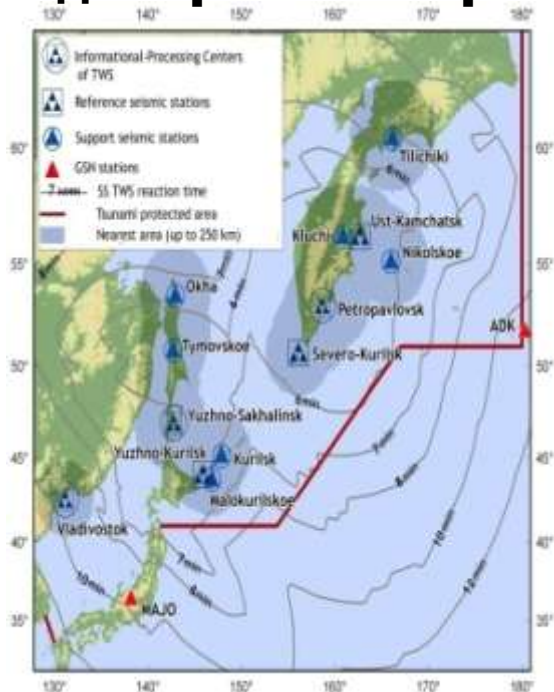
# Оценки магнитуды $M_S(20R)$ в оперативном режиме на РИОЦ «Петропавловск»



**Шкала магнитуд  $M_S(20R)$  пригодна к использованию в качестве опорной в СПЦ. За все годы ее эксплуатации наблюдается стабильность в оценках.**

**Гистограмма распределения расхождения оценки магнитуды по поверхностным волнам по данным NEIC (стандартная шкала  $M_S$ ) и оценок РИОЦ «Петропавловск» (шкала  $M_S(20R)$ ) по сети. Обработка в оперативном режиме**

# Моделирование времени реакции СП СПЦ



**Гистограмма распределения времени реакции СП СПЦ на землетрясения всего Мира за 2011 год (оценки РИОЦ «Петропавловск»)**

Область выборки	$\overline{\Delta T}$	$\sigma_{\Delta T}$	$\Delta T_{0.5}$	$dQ$	$\Delta T_{0.9}$	$\Delta T_{[0.95]}$	$N$
Весь Мир	10.765	7.128	8.546	9.865	18.033	20.995	192
200-км. зона	5.148	1.701	4.899	1.871	7.075	7.408	74
Дальняя зона	14.537	7.062	14.396	7.125	20.52	27.989	112

## **Проведен анализ СП СПЦ нового поколения в части оснащения методами и алгоритмами обработки сейсмологических данных, анализа результатов обработки, включая:**

- **методы и алгоритмы автоматического обнаружения и выделения сейсмических волн от сильных ( $M > 6.0$ ) землетрясений по трехкомпонентной записи, а также оценки направлений прихода волн;**
- **методы и алгоритмы обнаружения и оценки моментов первых вступлений сейсмических волн, оценки азимута на эпицентр сильных ( $M > 6.0$ ) землетрясений в автоматическом режиме по широкополосной трехкомпонентной записи;**
- **методы и алгоритмы определения гипоцентра и магнитуды по данным сейсмической станции, группы станций;**
- **методы и алгоритмы оценки положения эпицентра по первым участкам записей землетрясений и данных об исторической сейсмичности;**
- **алгоритм объявления тревоги цунами для пункта или участка побережья по наблюдаемой величине макросейсмической интенсивности ( $I_{пор.}$ );**
- **новую версию региональной магнитуды по поверхностным волнам MS(20-reg) для работы в автоматическом и автоматизированном режиме;**
- **алгоритм расчета тензора сейсмического момента для протяженного очага сильного землетрясения по широкополосным записям нескольких сейсмических станций на удалениях до 3000 км от эпицентра.**

## **Развитие методов оценки цунамигенного потенциала**

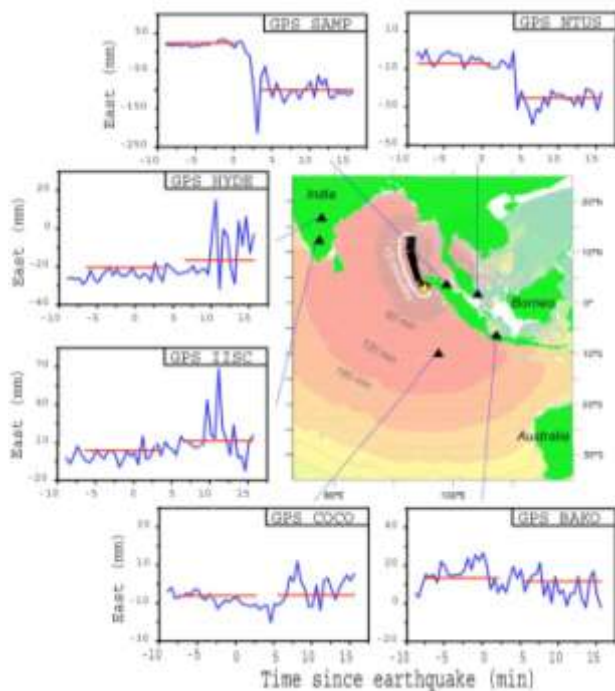
**Главный резерв** дальнейшего совершенствования службы кроется в снижении числа ложных тревог (при сохранении на разумно низком уровне риска пропуска сильного цунами). Успех здесь может быть достигнут только на основе привлечения дополнительных критериев и признаков цунамигенности, а также использования прямой регистрации цунами в открытом океане (в первую очередь, на подходе к наиболее важным защищаемым пунктам).

**Улучшение эффективности** работы СПЦ может быть достигнуто путем внедрения новых (дополнительных к сейсмологическим) технических средств регистрации, данные которых прямым или косвенным образом дадут возможность оценить движение дна океана, вызванное землетрясением. Это позволит в рамках существующих моделей возбуждения цунами оценить его цунамигенный потенциал более достоверно.

**Существенное улучшение** эффективности работы службы также может быть достигнуто за счет более точного определения границ зон для объявления тревоги. Положение и протяженность таких зон вдоль побережья должны быть пересмотрены (в большинстве случаев в сторону сокращения). 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.

**Важным элементом повышения эффективности** работы СПЦ являются также совершенствование организационной структуры службы и оптимизация регламентов ее работы.

**GPS данные могут обеспечить основу для надежного предсказания цунами, возможно даже в то время, как очаг землетрясения все еще испытывает разрыв. GPS в настоящее время используется Тихоокеанским центром цунами (Pacific Tsunami Center) в качестве добавочного инструмента для того, чтобы дополнить существующие системы раннего предупреждения о цунами, а также в СПЦ Индонезии.**



*Временной ряд (синие линии) восточной компоненты смещений грунта после катастрофического Суматра-Андаманского землетрясения, декабрь 2004 г.*

Данные получены непрерывными GPS приемниками (черные треугольники) в юго-восточной Азии. Землетрясение произвело изменения в положениях приемников, которые достаточно велики, чтобы оценить магнитуду землетрясения в пределах 15 минут, быстрее, чем было возможно с использованием только сейсмических данных.

## **Методы оценки цунамигенности землетрясений по сейсмологическим данным**

***Рассмотрены перспективные методики оперативной оценки параметров очага землетрясения в реальном времени по неполным данным. Проанализированы перспективы их разработки и внедрения в практику СП СПЦ. Приведена сводка методов определения характеристик цунамигенного землетрясения.***

***В том числе:***

***Быстрая оценка угрозы цунами до завершения основных расчетов по данным о макросейсмической интенсивности сотрясений в прибрежных пунктах.***

***Методика быстрой оценки гипоцентрального расстояния по параметру затухания «каппа».***

***Оценка тензора сейсмического момента в оперативном режиме.***

**Проведен анализ собранных и систематизированных данных по наблюдаемым высотам цунами и пиковым скоростям сильных движений в пунктах на побережье Японии (сейсмотектонические условия Камчатки, Курил и Японии являются близкими аналогами). Цель – обоснование пороговых уровней интенсивности сейсмических воздействий по эмпирическим инструментальным данным.**

**Получена предварительная зависимость высоты цунами от пиковых скоростей сейсмических воздействий наблюдаемых в прибрежном пункте.**

**Предварительные прогнозные зависимости высоты цунами от пиковых скоростей  $V_{max}$ : среднее + стандартное отклонение.**

<b><math>V_{max}</math>, см\с</b>	<b>H+s, см стандартная регрессия</b>	<b>H+ s, см регрессия Тобит</b>
<b>1</b>	<b>80</b>	<b>7</b>
<b>10</b>	<b>200</b>	<b>45</b>
<b>100</b>	<b>550</b>	<b>310</b>

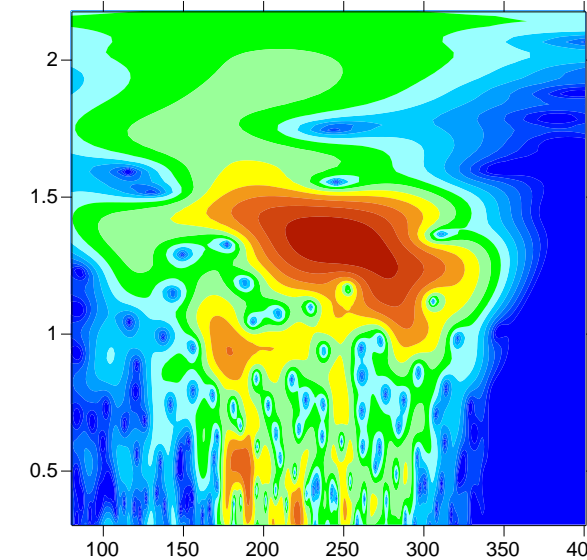
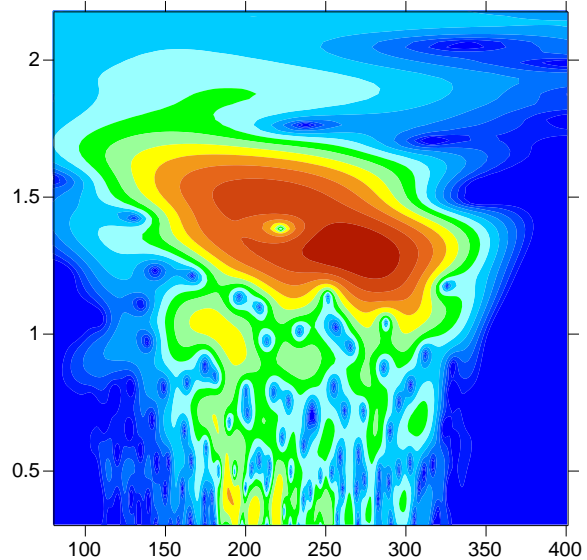
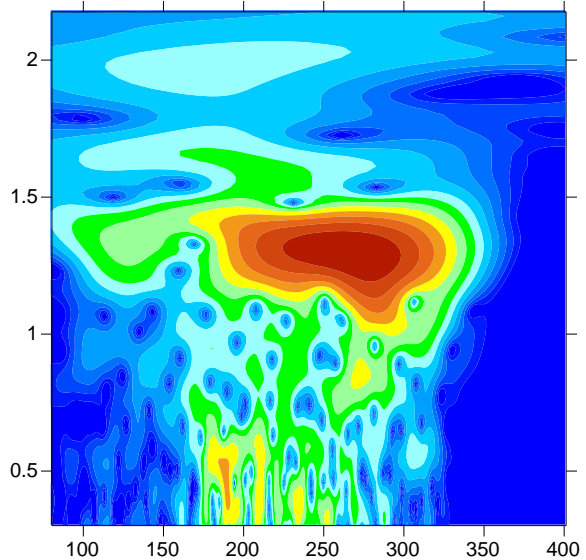
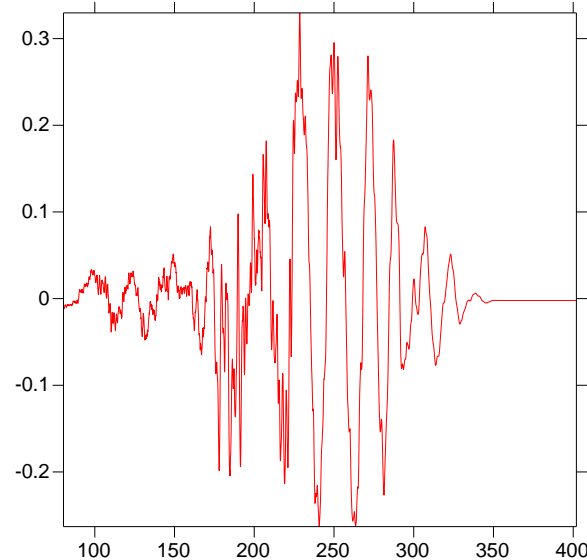
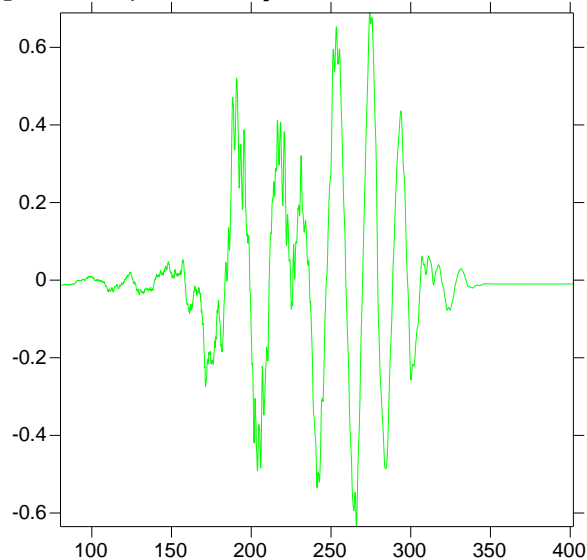
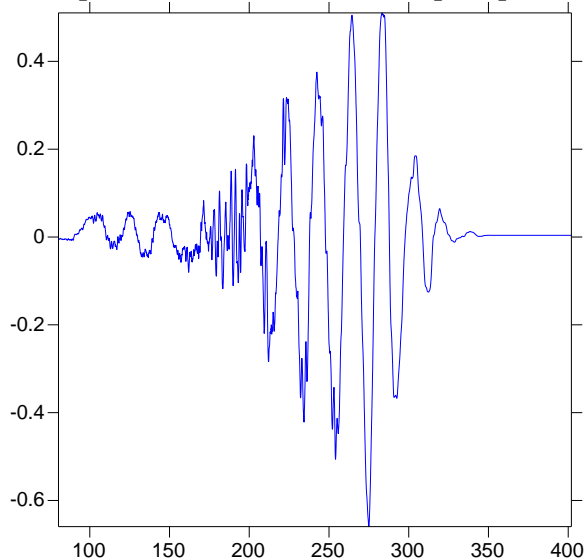
**Первый ориентировочный вариант эмпирической связи  
эпицентрального расстояния  $k$  с оценкой  $k_p$   
для группы Р-волн в спектральном окне 5–25 Гц**

<b>оценка <math>k_p</math> средняя по 3 комп., сек</b>	<b>диапазон <math>k</math>, км</b>	<b>оценка <math>k_p</math> по компоненте <math>Z_1</math>, сек</b>	<b>диапазон <math>k</math>, км</b>
<b>0.01</b>	<b>60-150</b>	<b>0.01</b>	<b>50-150</b>
<b>0.02</b>	<b>70-180</b>	<b>0.02</b>	<b>70-220</b>
<b>0.03</b>	<b>80-200</b>	<b>0.03</b>	<b>80-260</b>
<b>0.04</b>	<b>100-250</b>	<b>0.04</b>	<b>100-350</b>
<b>0.05</b>	<b>[130-330]?</b>	<b>0.05</b>	<b>130-400</b>
<b>0.06</b>	<b>--</b>	<b>0.06</b>	<b>[150-430]?</b>



# Анализ широкополосных сейсмических записей в спектрально-временном представлении для поиска возможных признаков цунамигенности сильных землетрясений (ИМГиГ).

Сейсмические сигналы от землетрясения 15.11.2006 г. с  $MLH=8.0$  на станции РЕТ и их спектрально-временные диаграммы (по горизонтальной оси время, по вертикальной логарифм периода, в сек)



**Разработан и программно реализован полуавтоматический алгоритм одновременной оценки тензора сейсмического момента, глубины и длительности временной функции эквивалентного точечного источника для очага сильного землетрясения по широкополосным записям объемных волн, зарегистрированным на расстояниях до 30 градусов от эпицентра.**

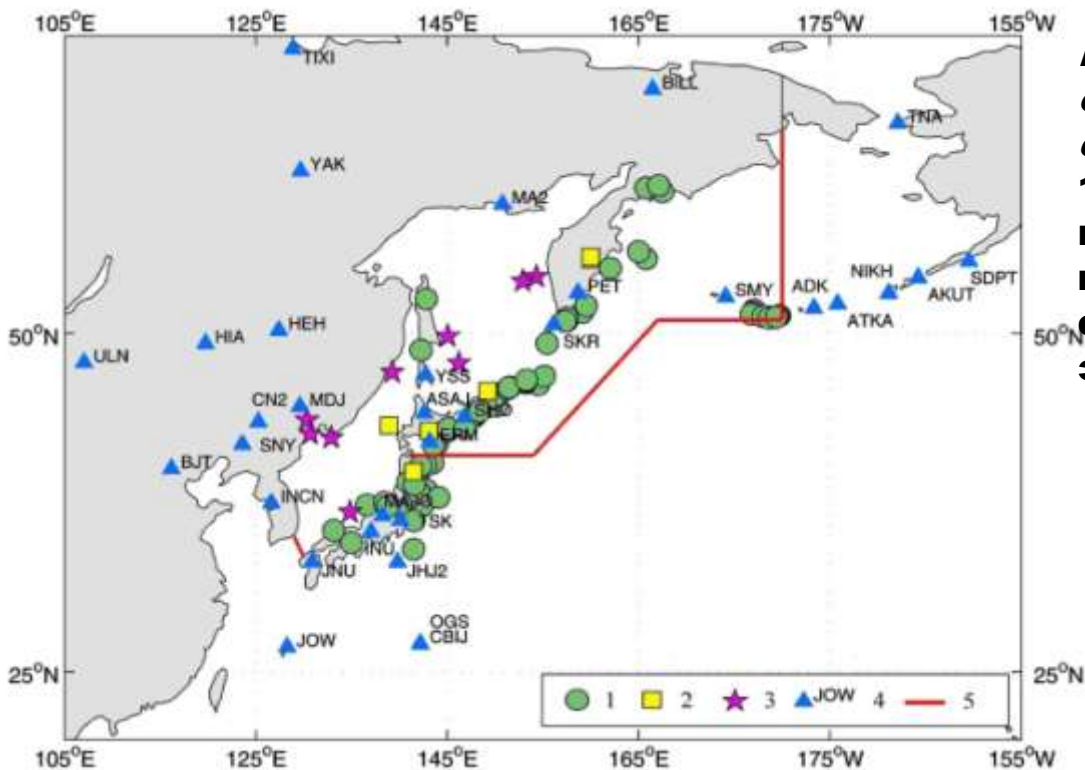
**Эффективность предложенного алгоритма опробована на примере 8 сильных землетрясений Дальнего востока России и Японии с моментными магнитудами от 7.6 до 9.1.**



**Сводка оценок параметров очагов, полученных с использованием разработанного алгоритма (RSMT), и оценок, приведенных в глобальном каталоге тензора момента центраида (GCMT).**

**Слева направо приведены: дата землетрясения; карта с положением эпицентра и использованных сейсмических станций; список станций; диаграммы механизмов очага, оценки моментной магнитуды  $M_w$ , глубины  $h$ , длительности  $\tau$ , и значения параметров механизма (углы простираия, падения и подвижки), полученные с использованием разработанного алгоритма (RSMT), и по глобальному каталогу CMT (GCMT). Диаграммы механизмов даны в стереографической проекции нижней полусферы.**

# Оперативная оценка магнитуды $M_{wp}$ умеренных и сильных землетрясений Дальнего Востока по набору частотных полос



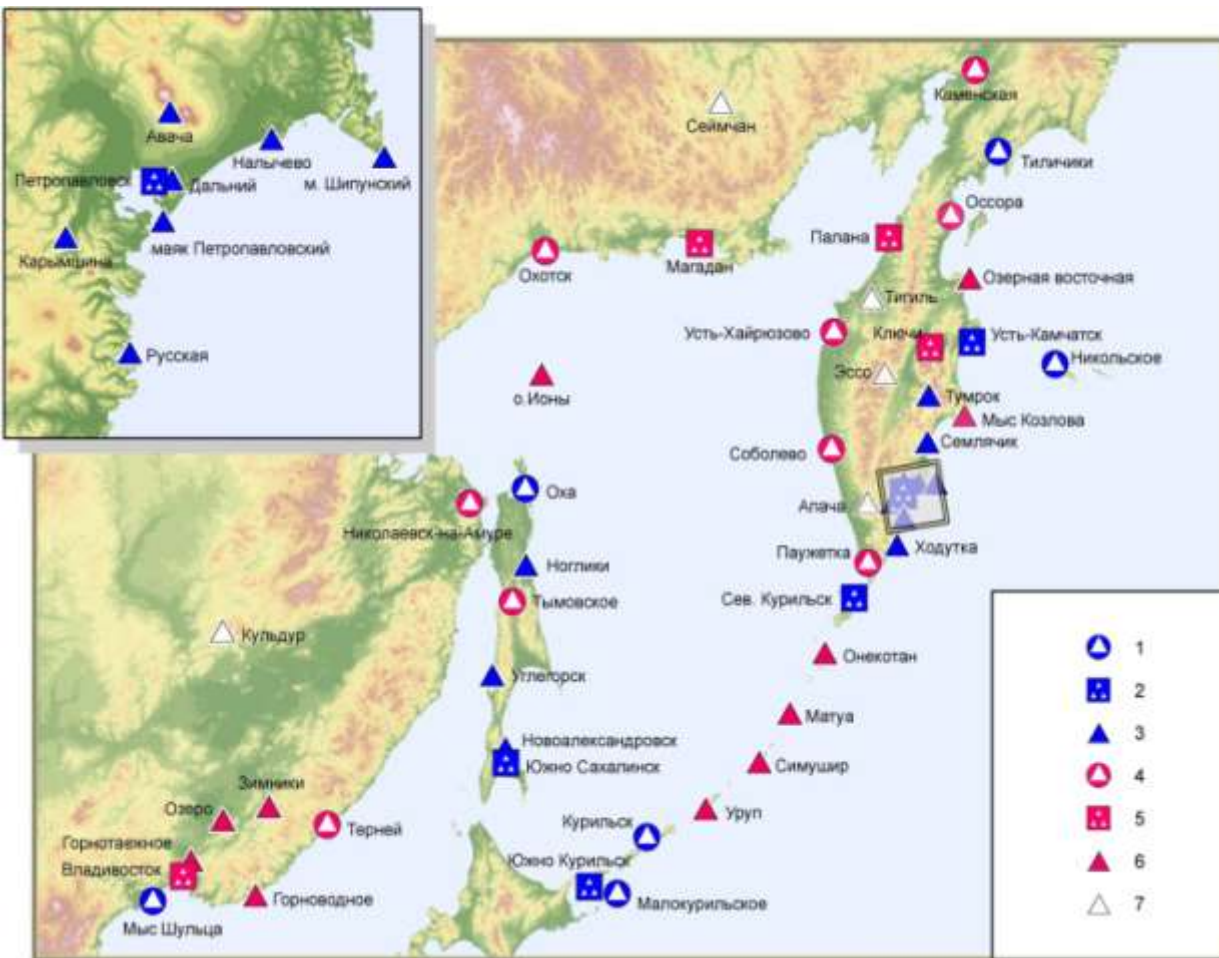
**Положение эпицентров обработанных землетрясений и сейсмических станций.**

**1 – 3 эпицентры землетрясений с глубиной  $h \leq 70$  км (1),  $71 \text{ км} \leq h \leq 300$  км (2) и  $h > 300$  км (3), 4 – сейсмические станции, 5 – граница зоны ответственности СПЦ.**

Интервал глубин, км	Среднее значение	Стандартное отклонение	Максимальное и абсолютное значение
0–70	–0.001	0.11	0.30
71–300	–0.12	0.08	0.24
300–700	–0.40	0.18	0.62

Параметры распределения невязки магнитуд с определениями NEIC

**На основе анализа структуры существующей Системы, ее возможностей, а также опыта ее создания и эксплуатации разработан проект развития Сейсмической подсистемы СПЦ на Дальнем Востоке России, реализация которого обеспечит уменьшение времени реакции Системы, повышение достоверности оценок цунамигенного потенциала, а значит и снижение числа ложных тревог цунами и повышение защищенности населения.**



**Карта (проект) сети специализированных сейсмологических и GPS наблюдений для СПЦ Дальнего Востока России к 2015г.**

**Специализированные сейсмические станции, созданные в 2006–2010:**  
**1. ВЦС; 2. ОЦС; 3. ПР СД.**  
**Новые станции:**  
**4. ВЦС; 5. ОЦС; 6. ПРСД; 7. другие станции**

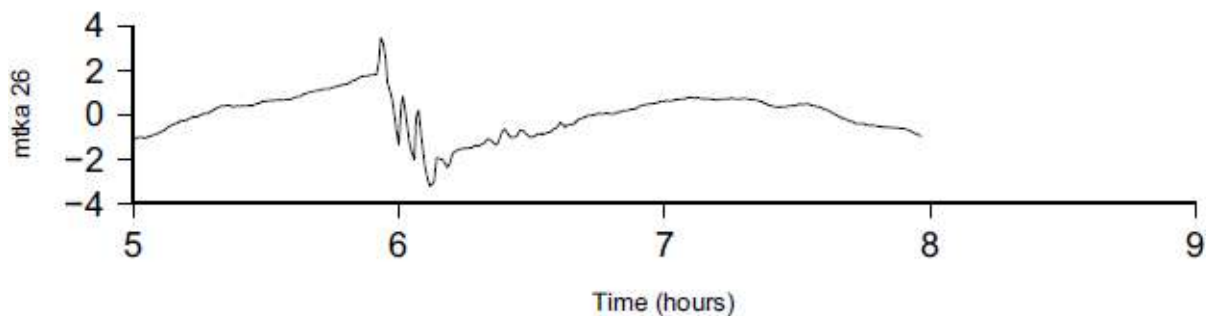
## Отклик на цунамигенные землетрясения в геофизических полях

### *Гидроакустический отклик, сейсмоионосферные возмущения от цунамигенных землетрясений*

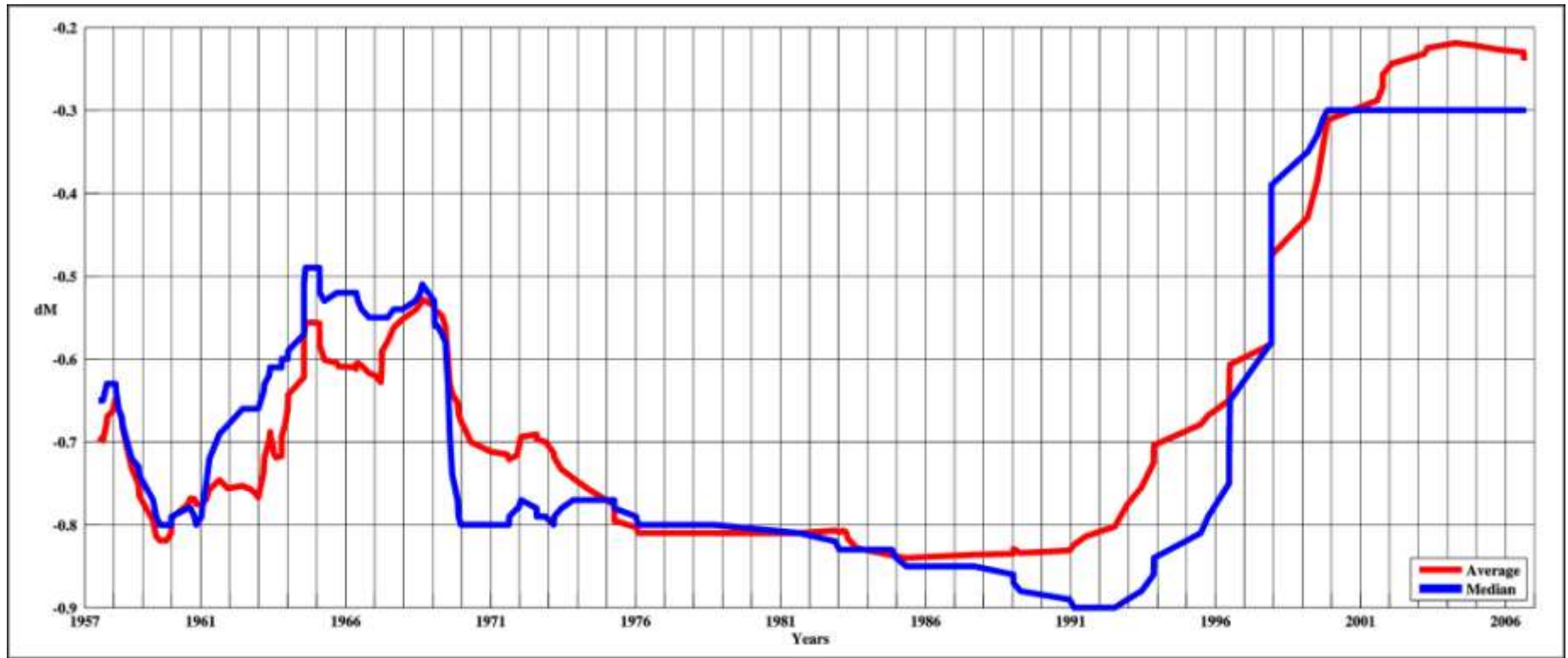
*Гохберг и др.*

Возмущение, зарегистрированное по вариациям полной электронной концентрации ионосферы (ПЭС), распространяется на расстояние свыше 1000 км от эпицентра со скоростями порядка первых километров в секунду (что в несколько раз превышает скорости волн цунами в океане) и регистрируется на этих расстояниях с опережением волны цунами более, чем на час. Возмущение имеет вид цуга колебаний ПЭС с периодом  $T \sim 5\text{--}15$  минут и хорошо выделяется из фоновых вариаций.

Особенность цунамигенных подводных землетрясений, отличающая их от землетрясений на суше, – резкий передний фронт и большая амплитуда сигнала в вариациях ПЭС, характерная для зоны вблизи эпицентра землетрясения. На Рис. дан пример такого сигнала (для землетрясения с  $M = 8.9$ , произошедшего 11.03.2011 в Японии).

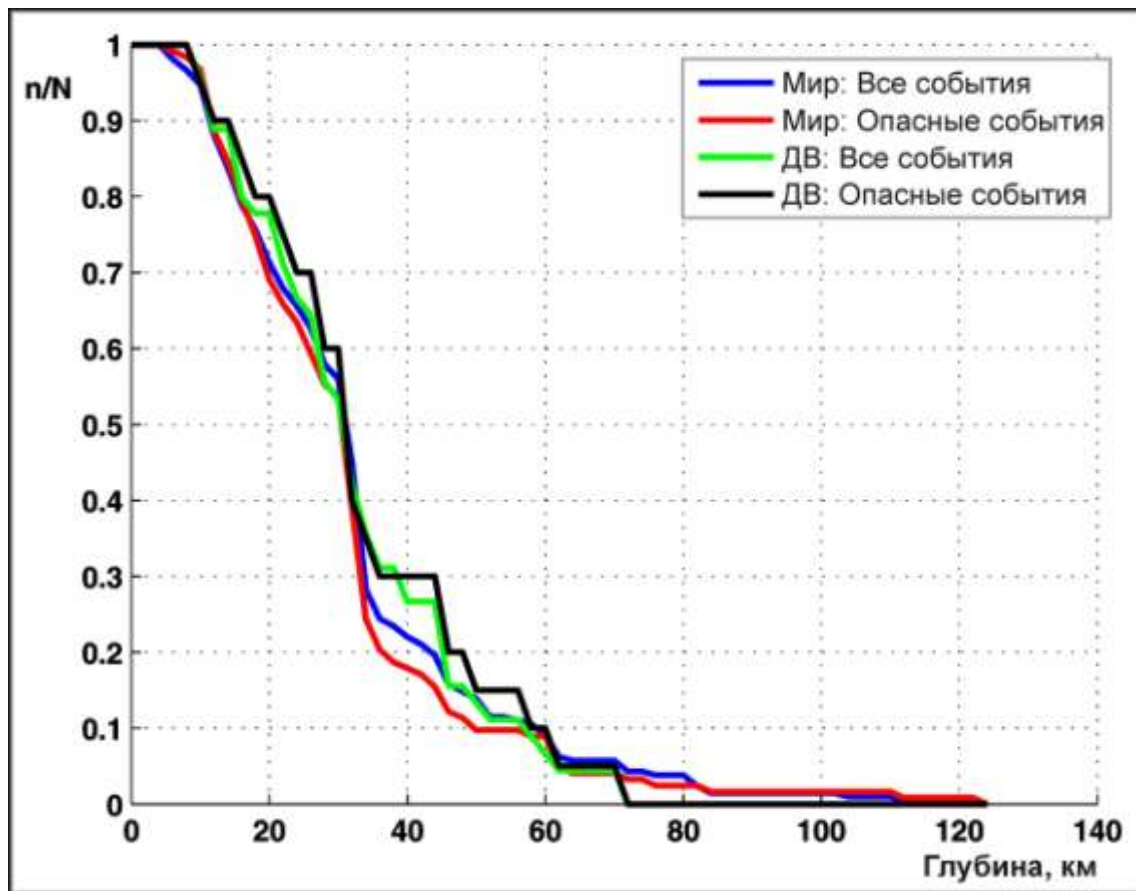


# Опорная шкала магнитуд для СПЦ: практика применения и поправки для станции «Петропавловск»



*Временной ход невязки магнитуды  $dM = M_s(\text{PET}) - M_s$  за период с 1957 по 2012 гг, скользящее окно по 20 событий*

## Глубина гипоцентра землетрясения как признак цунамигенности землетрясения



***В качестве информационной основы был использован каталог цунами Global Tsunami Database: Parametric Data Manager, созданный в Лаборатории цунами ИВМиМГ СО РАН***

**Доля от общего количества цунами, приходящаяся на события ниже пороговой глубины**

## **О РЕГЛАМЕНТАХ**

***Модернизированная СП СПЦ предоставляет возможность:***

**Использовать** в оперативном режиме **в качестве дополнительного критерия** опасности воздействия (возникновения) волн цунами на конкретный населенный пункт или участок побережья, обеспеченных сейсмическими наблюдениями в достаточной степени, **макросейсмическую интенсивность (I)**, регистрируемую по инструментальным данным.

Благодаря повышению точности оценок параметров землетрясений **локализовать зоны предупреждений** о возможности цунами в зависимости от магнитуды землетрясения.

В ПОЛОЖЕНИЕ о ФП РСЧС ЦУНАМИ

**Ввести** три оценки уровня тревоги – **«Возможно цунами!» «Слабое цунами!» «Сильное цунами!»**

**Все сообщения РИОЦ СП СПЦ в систему оповещения о тревоге цунами передаются через центры цунами территориальных УГМС.**



## **О новых регламентах РИОЦ ГС РАН**

### **Необходимо:**

- 1. Закончить процедуры отладки и проверки по вводу магнитуды  $M_S(20R)$  в оперативный режим.**
- 2. Ввести в практику для объявления тревоги цунами в качестве пороговой оценки магнитуды  $M_S(20R)$  по сети. Или в чрезвычайных условиях по одной станции с учетом таблицы поправок.**
- 3. Предусмотреть выработку сигналов тревоги для населенных пунктов, где размещены опорные станции СП СПЦ, по интенсивности сотрясений .**

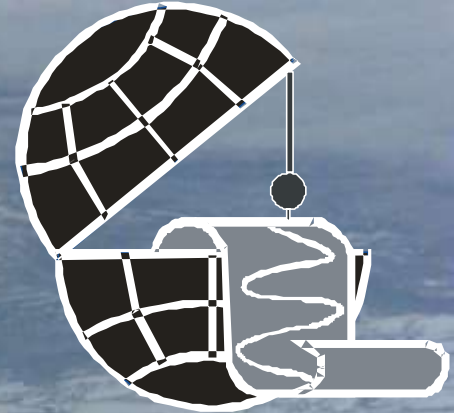
## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### ***Основные ожидаемые результаты внедрения результатов НИР***

- **Сокращение времени реакции СП СПЦ на сильные землетрясения**
- **Уменьшение числа ложных тревог, соответственно повышение доверия у населения и органов власти к сигналам СПЦ.**

### **Основные проблемы в СП СПЦ:**

**Недостаток финансового обеспечения на эксплуатацию**  
**Качество каналов передачи данных**



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**