



РЕГИОНАЛЬНЫЕ ШКАЛЫ МАГНИТУД ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ И ИХ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

***О.С. Чубарова ¹, А.А. Гусев ^{1,2}, Д.А. Ототюк ²,
А.А. Скоркина ²***

1. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

2. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН

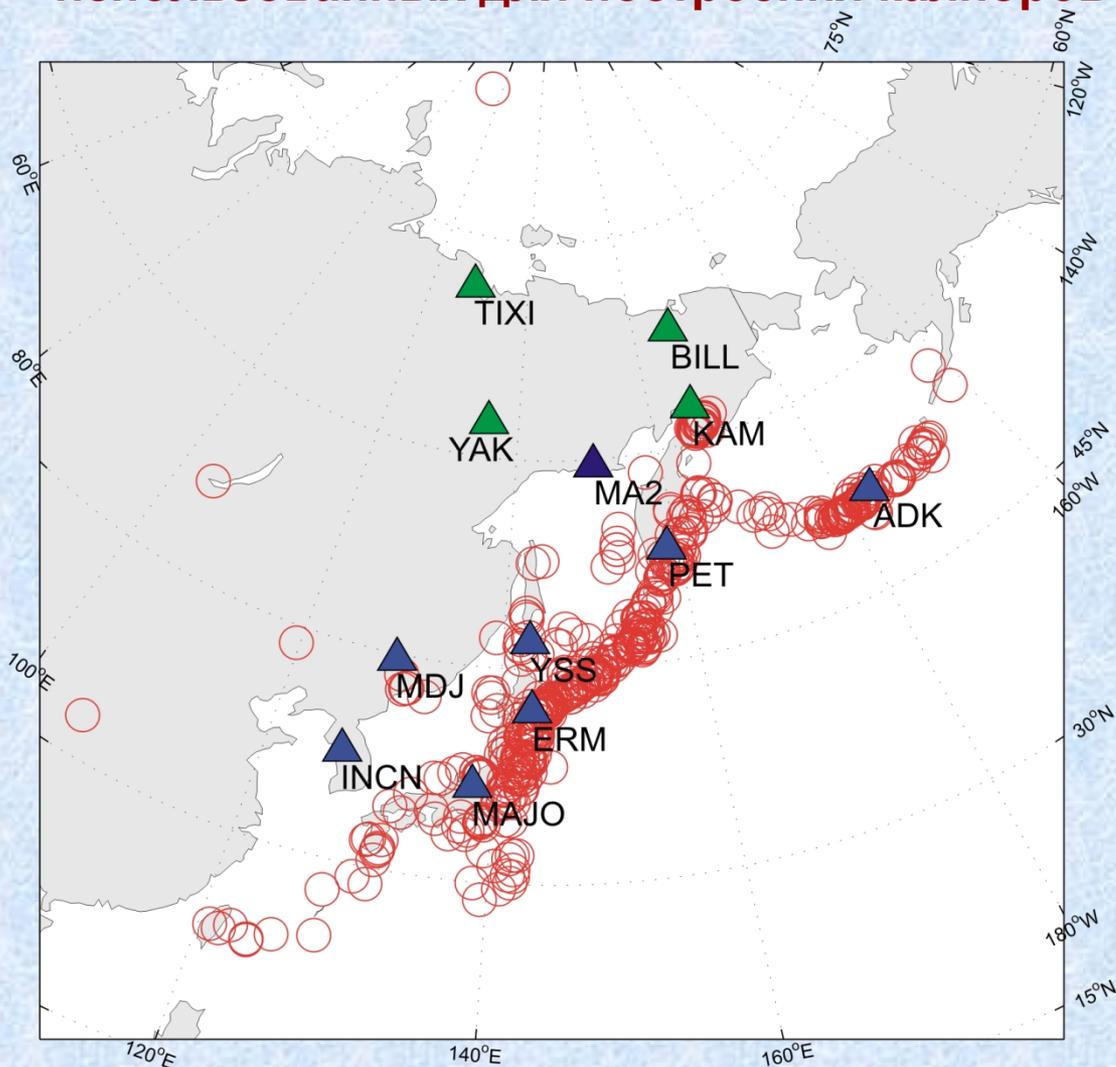
В период 2008-2017 гг. были созданы три новых региональных шкалы для магнитудной классификации землетрясений Дальнего Востока России по **амплитудам поверхностных волн периодов 20, 40 и 80 с**. Все три шкалы имеют четкую спектральную привязку, что дает им существенные преимущества при использовании в оперативном прогнозе цунами для побережий Дальнего Востока России.

Шкала $M_s(20R)$ расширяет в сторону малых эпицентральных расстояний (0.7° - 20°) область применимости классической шкалы $M_s(20)$ по Гутенбергу. Магнитуда определяется по амплитуде сигнала, предварительно пропущенного через цифровой полосовой фильтр, выделяющий компоненты с периодами вблизи 20 с. Измеряется амплитуда либо для поверхностных волн, либо, на небольших расстояниях 0.7° - 3° , для неразделимой волновой группы поверхностных и поперечных волн.

Использование шкалы $M_s(20R)$ для изученного региона в интервале эпицентральных расстояний 20° - 40° может быть рекомендовано как уточнение для этого диапазона расстояний стандартной шкалы $M_s(20)$. Региональная шкала $M_s(20R)$ была внедрена в Службу оповещения о цунами Дальнего Востока России и была включена в алгоритм автоматического оперативного анализа данных БЛИЦ [Чебров Д.В., Гусев, 2010, Чебров Д.В и др. 2013].

Магнитудная шкала $M_s(20R)$

Карта эпицентров землетрясений 1993-2009 гг. Северо-Западной части Тихоокеанского региона и цифровых сейсмических станций, использованных для построения калибровочной кривой $M_s(20R)$



12 сейсмических станций
433 землетрясения
(1659 трехкомпонентных записей на каналах ВН)
 $\Delta = 0.7^\circ - 40^\circ$ (~80 – 4500 км)

$M_s(20) = 4.0 - 8.2$

NEIC (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>)
 $H \leq 70$ км

Источники записей:
IRIS DMC
(<http://www.iris.edu/dMs/wilber.htm>),
База данных сектора «Петропавловск-цунами» Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

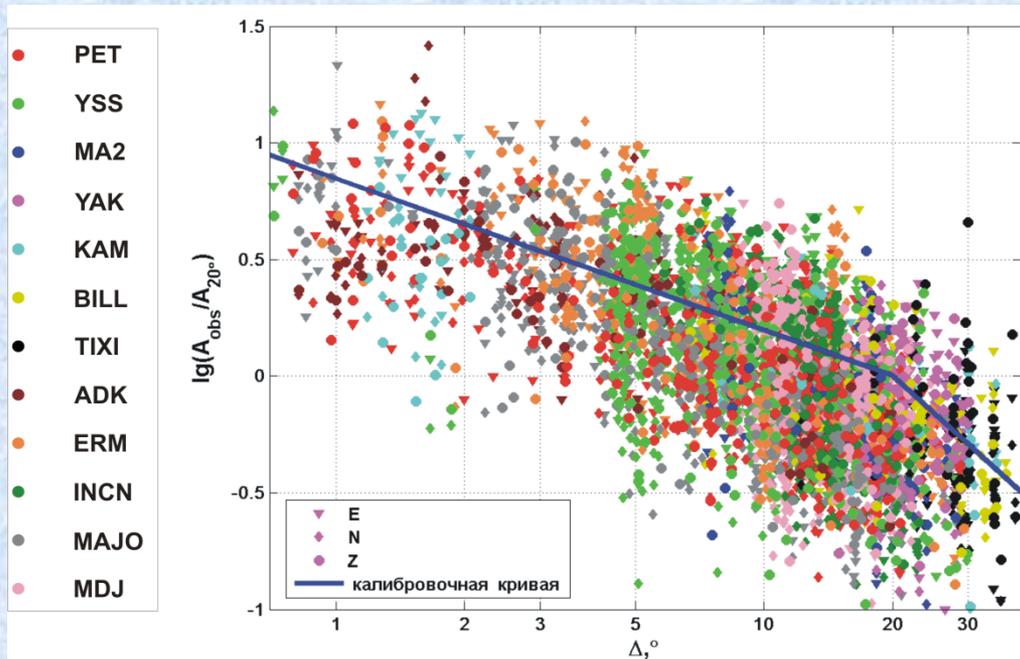
○ - эпицентр землетрясения

Сейсмические станции:

▲ - “островодужные”

▲ - “континентальные”

Методика построения магнитудной шкалы $M_s(20R)$ версии 2014 г. подробно изложена в [Чубарова, Гусев, 2017]. Первоначальные версии калибровочной функции шкалы $M_s(20R)$ [Чубарова, Гусев, Викулина, 2010] исходили из предположения согласования с «Пражской формулой» [Ванек и др., 1962] на эпицентральной дистанции $\Delta=20^\circ$, но это предположение оказалось неверным: при фиксированном значении $M_s(20R)$ на телесеизмических расстояниях, при $\Delta > 20^\circ$ амплитуда поверхностных волн на дальневосточных станциях заметно ниже, чем предсказывают формулы Гутенберга или «Пражская». Именно такой вариант калибровочной функции (версия 2009 г.) используется в настоящее время в Службе предупреждения о цунами.

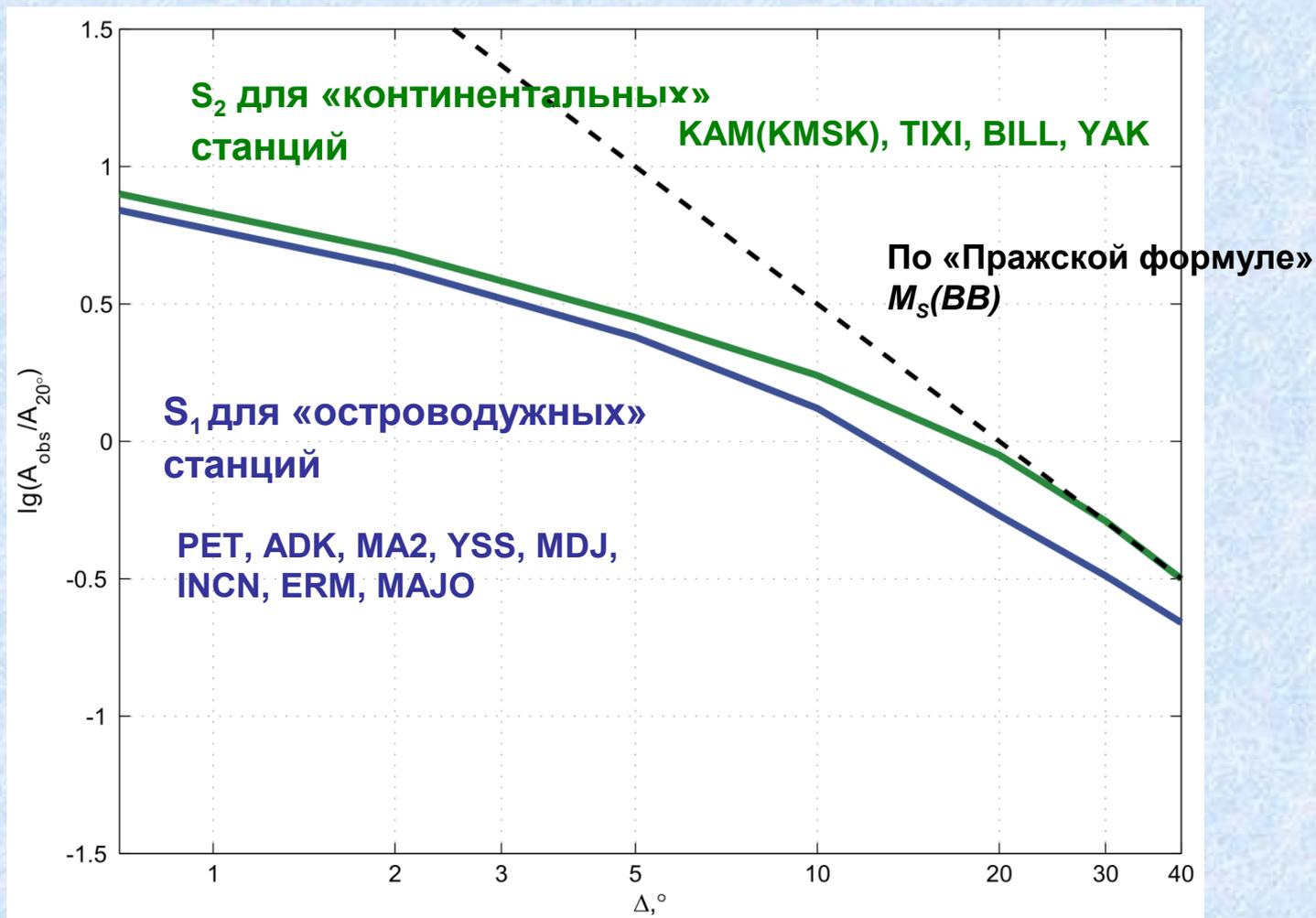


Зависимость «приведенных» амплитуд A_{obs}/A_{20° от расстояния Δ в сопоставлении с первым вариантом калибровочных функций для всех сейсмостанций.

Сегмент калибровочной кривой при $\Delta > 20^\circ$ это стандартный спад амплитуд по «Пражской формуле».

Видно, что точки вблизи $\Delta = 20^\circ$ лежат ниже ломаной.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ МАГНИТУДЫ $M_s(20R)$



Новый (2014 г.) вариант шкалы $M_s(20R)$ был выполнен на основе ревизии исходного подхода, с отказом от требования неперемной стыковки с калибровочной функцией по «Пражской формуле» вблизи $\Delta=20^\circ$. Чтобы соответствовать реальности, калибровочная функция шкалы $M_s(20R)$ продлена до расстояния 40° (4500 км) и в диапазоне $20^\circ - 40^\circ$ отклоняется от «Пражской формулы».

Расчетные формулы для определения магнитуды $M_S(20R)$ – калибровочные кривые

Магнитуда $M_S(20R)$ определяется как:

$$M_S(20R) = \lg(A/T) + \sigma(\Delta) \equiv \lg(A/T) - S(\Delta) + 5.460,$$

где $\sigma(\Delta)$ – калибровочная функция в традиционной записи, $S(\Delta)$ – ее модификация, Δ – эпицентральное расстояние в градусах, $0.7^\circ \leq \Delta \leq 40^\circ$,

A – среднеквадратическое по трем каналам значение максимальной «двойной амплитуды» смещения в поверхностной волне на выходе фильтра в мкм во временном окне $[t_s, t_s+600$ с], t_s – время вступления S-волны, $T = 20$ с.

Для отдельной сейсмической станции численные значения калибровочных функций $S(\Delta)$ для определения магнитуды $M_S(20R)$ определяются по данным таблицы, используя линейную интерполяцию по аргументу $\lg(\Delta)$.

Параметры	Δ , градусы								
	<0.7	0.7	2	5	10	20	30	40	>40
$\lg(\Delta)$		-0.1549	0.3010	0.6990	1.0000	1.3010	1.4771	1.6021	
$S_1(\Delta)$	Не определ.	0.90	0.69	0.45	0.24	-0.05	-0.29	-0.50	Не определ.
$S_2(\Delta)$	Не определ.	0.84	0.63	0.38	0.12	-0.27	-0.49	-0.66	Не определ.

Для шкалы $M_s(20R)$ получены невязки стационарных оценок магнитуды относительно среднего по сети $M_s(20R)_{st} - M_s(20R)$ и невязки $M_s(20R)_{st} - M_s(20)$ относительно $M_s(20)$. Дополнительно нашли невязки среднесетевой магнитуды $M_s(20R)$ относительно магнитуды $M_s(20)$. В статистику среднесетевых магнитуд включали лишь землетрясения, зарегистрированные не менее, чем двумя сейсмостанциями.

Параметры распределения средних невязок магнитуды

Тип станций	Число событий	Число стационарных данных	$M_s(20R)_{st} - M_s(20R)$	$M_s(20R)_{st} - M_s(20)$		$M_s(20R) - M_s(20)$	
			σ	μ	σ	μ	σ
Все	361	1584	0.17	0.01	0.22	0.00	0.17
«Островодужные»	366	1365	0.17	0.01	0.22	0.00	0.17
«Континентальные»	60	176	0.17	0.00	0.21	0.00	0.17

Шкала $M_s(20R)$ разрабатывалась для смещений, но в режиме реального времени возможно исключение обратной фильтрации для перехода от записи скорости к записи смещения, что сейчас и происходит на практике. Данный факт был проверен на нескольких десятках записей и вполне подтвердился.

Внедрение шкалы $M_s(20R)$ в практику РИОЦ Дальнего Востока

В состав Службы Предупреждения об угрозе Цунами на Дальнем Востоке России входят три подразделения: Региональный информационно-обрабатывающий центр (РИОЦ) «Петропавловск», РИОЦ «Южно-Сахалинск» и РИОЦ «Владивосток» [Чебров Д.В. и др., 2013, Ототюк и др., 2017]. Согласно регламенту, каждый РИОЦ ориентируется на определение магнитуды $M_s(BB)$, по Ванеку-Соловьеву, полученной по **своей одной опорной станции**.

В период **2009–2011** года началось внедрение $M_s(20R)$ в оперативную работу всех трех РИОЦ – и это стало первой **единой шкалой** для трех РИОЦ. $M_s(20R)$ – *сетевая* оценка, которую каждый из РИОЦ получает по практически идентичному набору станций.

С тех пор по настоящее время, все три РИОЦ используют одну калибровочную кривую, **единую для всех каналов и всех станций, версия 2009 года**. Магнитуда $M_s(20R)$ определяется как для поверхностных, так и для промежуточных и глубоких очагов землетрясений.

Количество полученных оценок $M_s(20R)$ в оперативной работе

Период / РИОЦ	«Петропавловск»	«Южно-Сахалинск»	«Владивосток»
2009	50	-	-
2010	156	36	-
2011	361	27	162
2012	410	5	86
2013	404	-	167
2014	299	-	244
2015	323	196	249
2016	449	198	255
2017 (0.5 года)	260	131	110
Итого	1712 (301)*	593 (294)*	1273 (85)*
Диапазон $M_s(20R)$	3.0 - 8.3	3.0 - 7.9	3.0 - 7.7

Примечание: в скобках приведено количество оценок магнитуды $M_s(20R)$ для эпицентральных расстояний $\Delta > 20^\circ$, где калибровочные кривые $M_s(BB)$ и $M_s(20R)$ по версии 2009 года совпадают

Для РИОЦ «Петропавловск» магнитуда $M_s(20R)$, наряду с классом K_s , на первом этапе являлась дополнительным контролем традиционной магнитуды M_s^{PET} при оперативной работе. С ноября 2016 года данные по $M_s(20R)$ вносятся в бюллетень станции «Петропавловск» [Ототюк и др., 2017].

За период с 01.01.2016 по 01.08.2017 года из 537 зарегистрированных землетрясений магнитуда $M_s(20R)$ в оперативном режиме была определена для 447 событий, M_s^{PET} - для 246, обе магнитуды - для 156 землетрясений.

В случае, когда землетрясение, по разным причинам, не прописывается на опорной станции РЕТ, т.е. M_s^{PET} не определяется, $M_s(20R)$ – единственная шкала для определения магнитуды.

Возможности учета глубины гипоцентра при оценке магнитуды $M_s(20R)$

В РИОЦ «Петропавловск» магнитуда $M_s(20R)$ определяется для землетрясений с любой глубиной гипоцентра.

Параметры сильных землетрясений

	Дата	Глубина КФ / (Neic)	M_w (GCMT)	M_s	M_s^{PET}	$M_s(20R)$
Жупановское	2016.01.30	178 (177)	7.2		5.7(?)	6.5 (?)
Южно-Озерновское	2017.03.29	43 (17)	6.6	6.6	6.7	6.6
Алеутское	2017.06.02	35 (5)	6.7	6.9	6.7	6.7
Ближне-Алеутское	2017.07.17	7 (11)	7.8	7.7	7.6	7.6

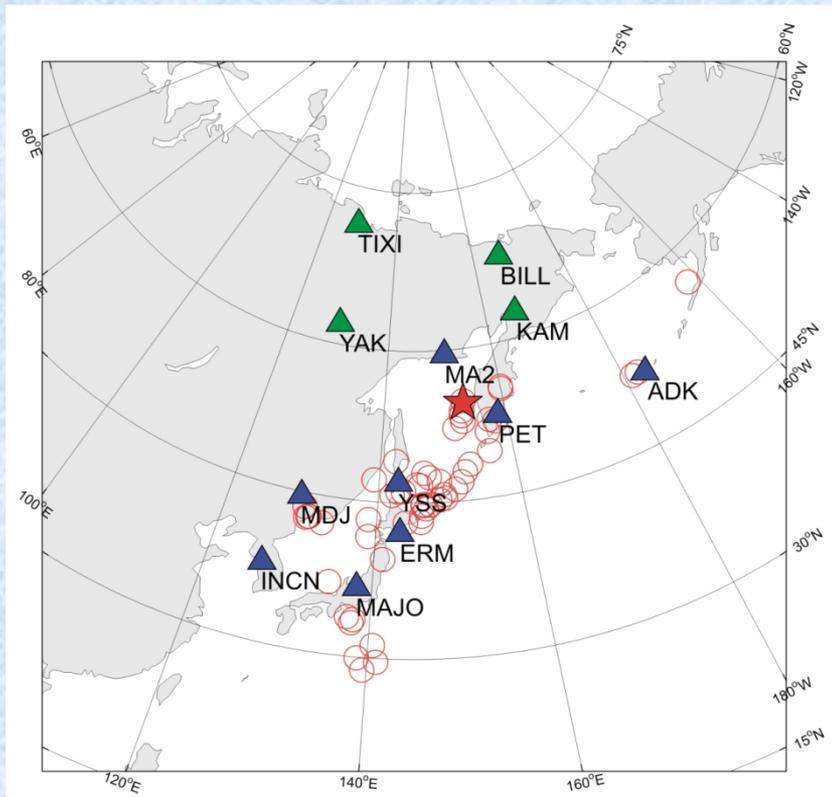
Магнитуда $M_s(20)$ – $18 \text{ с} \leq T \leq 22 \text{ с}$, $20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$, $H < 50 \text{ км}$.

Магнитуда $M_s(BB)$ – $3 \text{ с} < T < 60 \text{ с}$, $2^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$, $H < 80 \text{ км}$.

Магнитуда $M_s(20R)$ – $16 \text{ с} \leq T \leq 24 \text{ с}$, $0.7^\circ \leq \Delta \leq 40^\circ$, $H < 70 \text{ км}$.

Возможности учета глубины гипоцентра при оценке магнитуды $M_s(20R)$ были изучены в работе [Чубарова, Гусев, 2013]. Толчком послужило Охотоморское землетрясение **24.05.2013 г.**, $M_w=8.3$, $H = 608$. **$M_s(20R)=7.3$**

Карта эпицентров глубоких землетрясений и цифровых сейсмических станций



55 землетрясений

$M_w = 5.4 - 8.3$

$H = 76 - 656$ км

○ - эпицентр землетрясения

★ - эпицентр землетрясения

24.05.2013, $H=608$ км, $M_w=8.3$

Сейсмические станции:

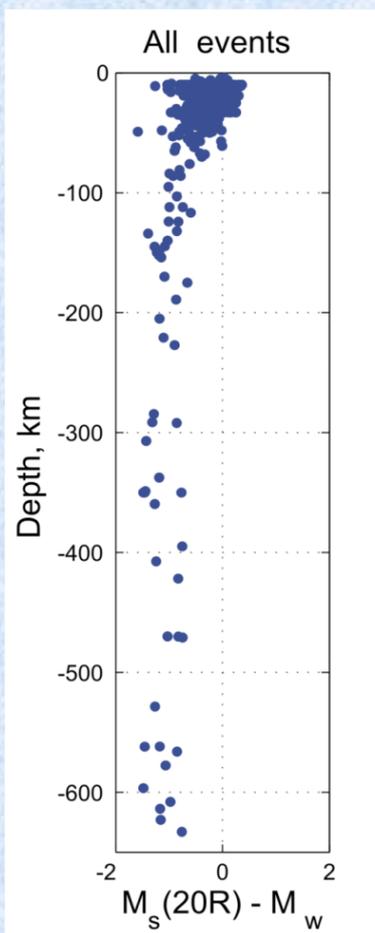
▲ - “островодужные”

▲ - “континентальные”

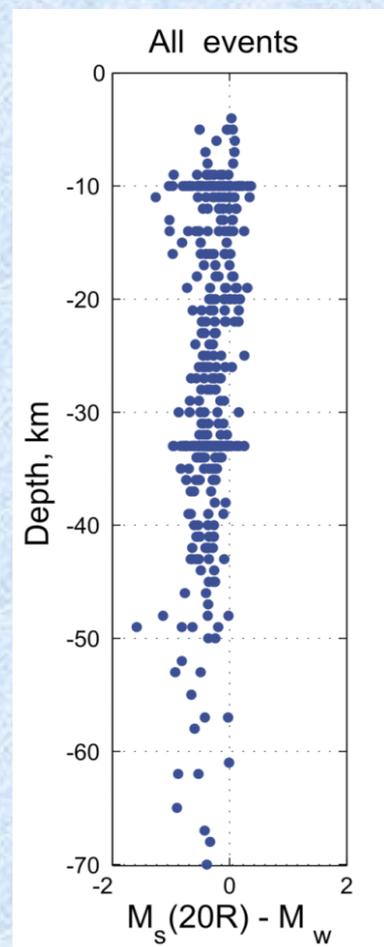
ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЛУБИНЫ РАЗНОСТИ МАГНИТУД $M_S(20R)$ И M_W

$$dM(H) = M_S(20R) - M_W$$

H= 0 – 650 км

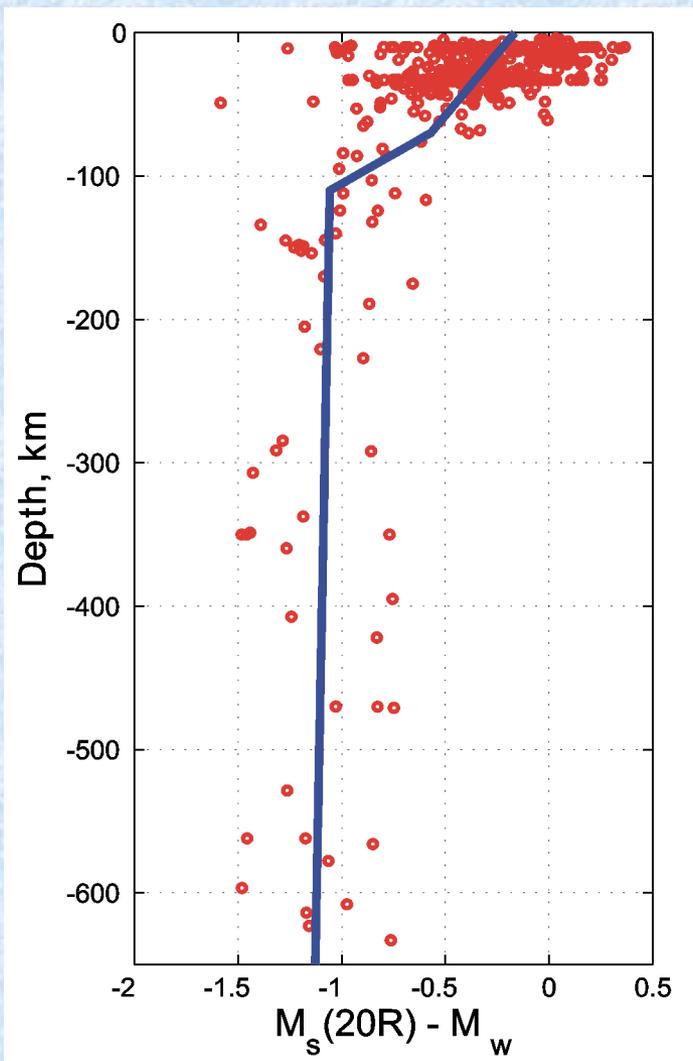


H= 0 – 70 км



Глубже 100 км функция $dM(H) = M_S(20R) - M_W$ стабилизируется

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГЛУБИНЫ РАЗНОСТИ МАГНИТУД $M_S(20R)$ И M_W



Узловое значение H , км	0	70	110	650
$dM(H)$	-0.10	-0.57	-1.06	-1.12

Для глубин $H > 110$ км, наклон **0.0002 1/км**

$$dM(H) = 0.000178H - 1.0266, \text{ se} = 0.24$$

Для $H = 0 - 70$ км, наклон 0.056 1/км.

$$dM(H) = 0.0056H - 0.1704, \text{ se} = 0.27$$

Теоретическая оценка по M_S в работе [Panza et al, 1989] для $H = 30 - 80$ км – 0.0174 1/км.

$$M_W \sim M_S(20R) + 1$$

На основании зависимости $dM(H)$, путем введения поправок за глубину, можно получить оценку M_w . Например, для Жупановского землетрясения 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, [Чебров В.Н. и др., 2016]. Оперативная оценка $M_s(20R) = 6.5$, что, с учетом глубины землетрясения ($H = 160$ км), дает оценку $M_w = 6.5 + (\text{поправка} = 1.0) = 7.5$.

Введение поправок за глубину **дает в перспективе** возможность уточнения оперативной оценки магнитуды промежуточных и глубоких землетрясений на Дальнем Востоке. Полученные нами результаты основаны на данных 55 землетрясений и требуют проверки на более представительном материале.

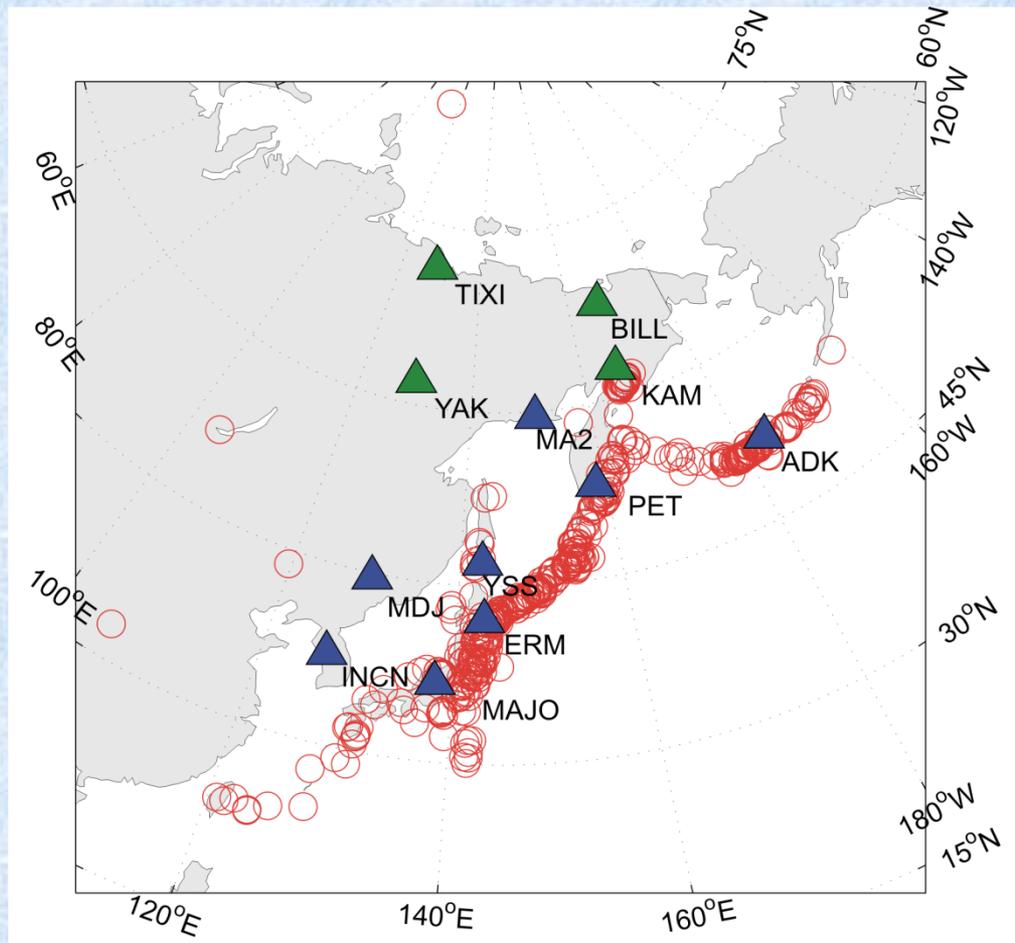
В настоящее время в программе «DIMAS» обеспечена возможность перехода на новую версию калибровочных кривых для определения магнитуды $M_s(20R)$.

Региональные магнитудные шкалы по поверхностным волнам периодов 40 и 80 с

Достаточно успешный опыт эксплуатации шкалы $M_s(20R)$ дал основания опробовать аналогичный подход для волн более длинных периодов. Необходимость в магнитудных оценках такого рода связана с тем, что для задачи **прогноза цунами, чем длиннее период волны, тем надежнее прогноз**. Систематически возникают случаи, когда на периодах 20 с и короче излучение очага необычно низкое. В результате как магнитуда $M_s(BB)$, так и несколько более эффективная магнитуда $M_s(20R)$ дают искаженную, заниженную оценку цунамигенного потенциала землетрясений. Это случай так называемых цунами-землетрясений, для которых недооценка магнитуды (в терминах M_w) может составлять 0.6 - 0.7, а возможно, и более. Для страховки от таких случаев пороговую магнитуду приходится снижать до уровня $M_s = 7$, что неизбежно ведет к ненадежным оценкам опасности и, как следствие, к большому числу ложных тревог. Снизить их число, не ухудшая надежности выработки предупреждения – важная задача.

Разработанные длиннопериодные магнитудные шкалы $M_s(40)$ и $M_s(80)$ откалиброваны так, чтобы давать несмещенную оценку моментной магнитуды M_w в критическом диапазоне $M_w = 7.5 - 8.8$ и снизить риск пропуска цунами-землетрясений

Карта эпицентров землетрясений 1993-2009 гг. Северо-Западной части Тихоокеанского региона и цифровых сейсмических станций, использованных для построения калибровочных функций $M_s(40)$ и $M_s(80)$.



12 сейсмических станций

**433 землетрясения
(~ 1250 трехкомпонентных записей на каналах ВН)**

$\Delta = 0.7^\circ - 40^\circ$ (~80 – 4500 км)

$M_w = 4.7$ до 8.3

Каталог GCMT

<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

$H \leq 70$ км

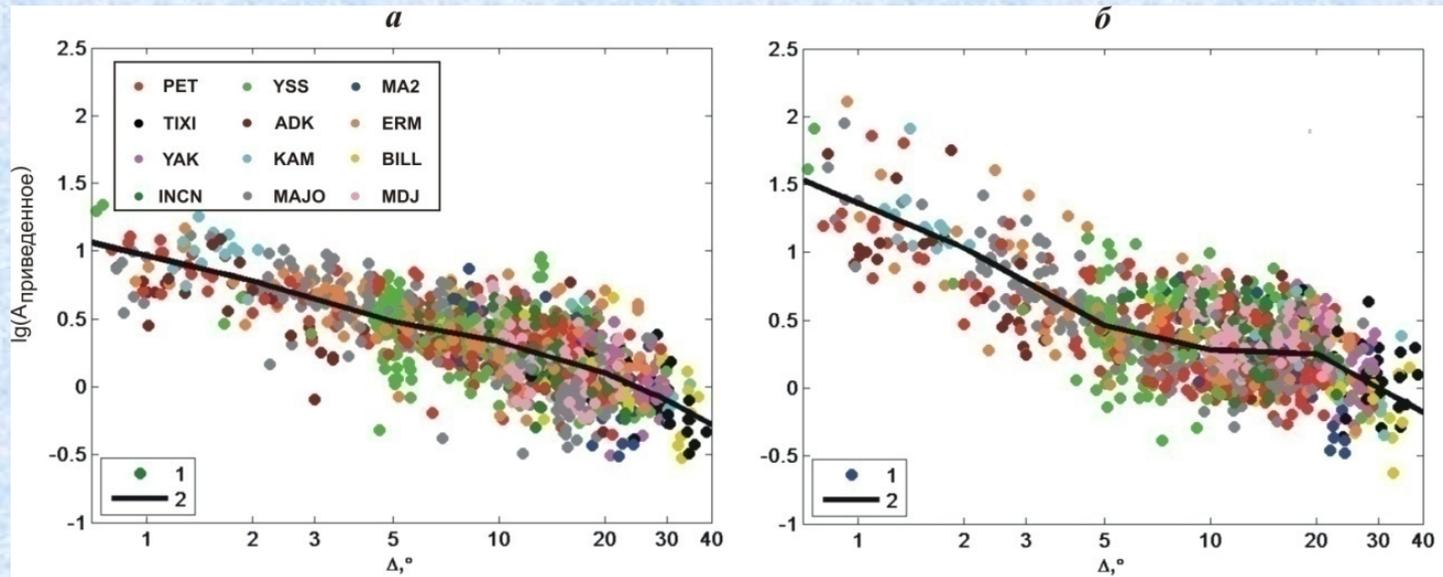
○ - эпицентр землетрясения

Сейсмические станции:

▲ - “островодужные”

▲ - “континентальные”

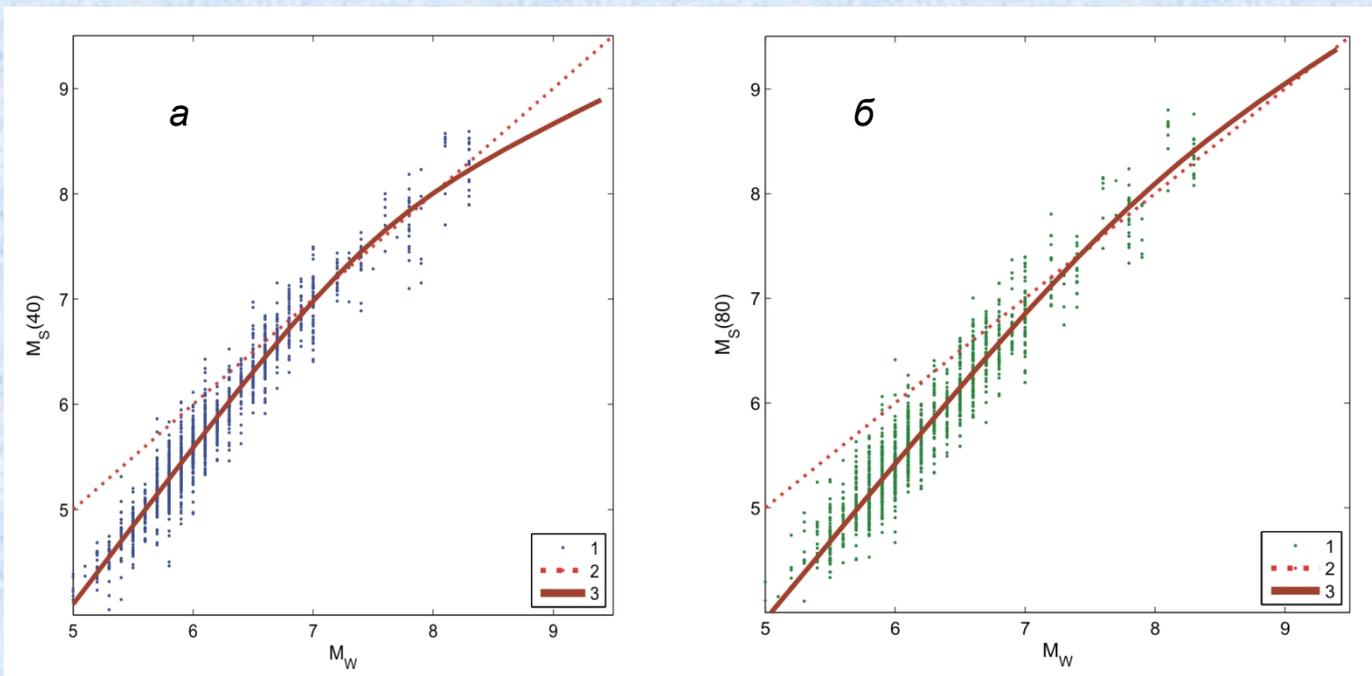
Методика построения магнитудных шкал $M_s(40)$ и $M_s(80)$ подробно изложена в работе [Гусев, Чубарова, 2016].



Нормированные стационарные амплитуды для магнитуд $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б) и калибровочные функции.

1- наблюдаемые данные, отображено нормированное среднеквадратичное значение амплитуд трех компонент; 2 – калибровочные функции для магнитуд $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б).

Стандартное отклонение распределения невязок индивидуальных нормированных амплитуд составляет 0.20 для $M_s(40)$ и 0.25 для $M_s(80)$



Зависимость полученных оценок магнитуды землетрясений $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б) от магнитуды M_W

1- магнитуды землетрясений $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б), 2 – линия при равенстве $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б) магнитуде M_W ; 3 – калибровочная функция для магнитуд $M_s(40)$ и $M_s(80)$.

Были получены оценки ошибок прогноза значений M_W по принципу $M_W = M_s(40)$ для $M_W > 7$ или по принципу $M_W = M_s(80)$ для $M_W > 7.2$. Средняя ошибка менее 0.03, стандартное отклонение - 0.25 – 0.28.

Таким образом, при больших значениях магнитуд $M_s(40)$ и $M_s(80)$ являются неплохими оперативными оценками M_W даже для случая одиночной станции. При магнитудах $M_W > 8.3$, возможно занижение оценок (до -0.2 - 0.3 при $M_W \sim 9.2$), что приемлемо при оперативной работе. В оперативной работе в качестве оценки M_W следует использовать большее значение из $M_s(40)$ и $M_s(80)$.

Заключение

Рассмотрены возможности применения трех спектрально определенных региональных магнитудных шкал $M_s(20R)$, $M_s(40)$ и $M_s(80)$ для улучшения надежности прогноза опасного цунами для побережий Дальнего Востока, а так же преимущества, недостатки и перспективы, и выявленные в процессе внедрения шкалы $M_s(20R)$ в практику Службы предупреждения о цунами.

Список литературы

1. Ванек И., Затопек А., Карник В. и др. Стандартная шкала магнитуд // Изв. АН СССР. сер. геофизич. 1962, № 2. С. 153 – 158.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22-34.
3. Гусев А.А., Чубарова О.С. Региональные длиннопериодные магнитудные шкалы и их возможности для предупреждения о цунами // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т.15. №1. С. 43-56.
4. Ототюк Д.А., Помазная Т.В., Скоркина А.А., Дрознин Д.В., Чебров Д.В. *Показатели работы РИОЦ «Петропавловск» в рамках Службы предупреждения о цунами и Службы срочных донесений в 2016–2017* // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский.
5. Чебров Д.В., Гусев А.А. Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 35-57.
6. Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Ототюк Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОНЦ «Петропавловск» в рамках Службы предупреждения цунами // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября - 5 октября 2013 г., г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 299-303.
7. Чебров В.Н., Кузаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. №1. Вып. №29. С. 5-16.
8. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_s(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 58-63.
9. Чубарова О.С., Гусев А.А. Уточненные калибровочные функции дальневосточной магнитудной шкалы $M_s(20R)$ и изучение возможностей учета глубины гипоцентра при оценке магнитуды // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября - 5 октября 2013 г., г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 127-130.
10. Чубарова О.С., А.А. Гусев. Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам для землетрясений Дальнего Востока России // Физика Земли. 2017. №1. С. 60-71.
11. Panza G.F., Duda S.J., Cernobori L., Herak M. Gutenberg's surface-wave magnitude calibration function: theoretical basis from synthetic seismograms // Tectonophysics. 1989. V. 166. P. 35-43.

Спасибо!