

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ШКАЛЫ МАГНИТУД ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ И ИХ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ**Чубарова О.С.¹, Гусев А.А.^{1,2}, Ототюк Д.А.², Скоркина А.А.²**¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ochubarova@emsd.ru*² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский***Введение**

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. Шкала $M_s(20R)$, использующая периоды поверхностных волн в неширокой полосе периодов вблизи $T = 20$ с, позволяет сохранять историческую преемственность с классической шкалой M_s Гутенберга. Выделение этой полосы выполняется путем полосовой цифровой фильтрации. 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 $M_s(20)$ [10]. Региональная шкала $M_s(20R)$ была внедрена в службу оповещения о цунами дальнего Востока России и включена в алгоритм автоматического оперативного анализа данных БЛИЦ [8, 5, 6].

Достаточно успешный опыт эксплуатации шкалы $M_s(20R)$ дал основания опробовать аналогичный подход для волн более длинных периодов. Нужда 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.

Шкалы $M_s(40)$ и $M_s(80)$ используют амплитуды поверхностных волн после полосовой фильтрации в нешироком диапазоне периодов вблизи периодов 40 и 80 с [3]. При построении калибровочных функций проводилась нормализация наблюдаемых амплитуд, для чего использовались теоретические спектральные функции, значения которых вычислялись для каждого события на основе моментной магнитуды M_w и частоты излома спектра («корнер-частоты»), оцененной по M_w на основе известных корреляционных зависимостей. Абсолютный уровень в формуле для вычисления магнитуды выбран так, что значения новых магнитуд – $M_s(40)$ и $M_s(80)$ численно близки к M_w . Их использование позволит получить приемлемую оперативную оценку магнитуды M_w вплоть до $M_w = 8.5$ – 8.7 даже в условиях редкой сейсмической сети. Для более высоких магнитуд $M_w = 8.8$ – 8.9 найденные значения $M_s(40)$ и $M_s(80)$ будут являться оценками M_w снизу, что приемлемо для целей службы предупреждения о цунами.

Рассмотрена возможность применения региональных магнитудных шкал для уточнения оперативной оценки магнитуды промежуточных и глубоких землетрясений по данным поверхностных волн. Все три шкалы имеют четкую спектральную привязку, что дает им существенные преимущества при использовании в оперативном прогнозе цунами для побережий Дальнего Востока России.

Исходные данные

В качестве исходного материала в работе использованы записи 433 землетрясений северо-западной части Тихоокеанского региона периода 1993–2009 гг. на 12 широкополосных цифровых сейсмических станциях (PET, YSS, MA2, YAK, KAM, ADK, TIXI, BILL, MDJ, INCN, ERM, MAJO), всего ~1500 трехкомпонентных записей каналов ВН. Цифровые записи землетрясений выбирались из архива IRIS DMC (<http://www.iris.edu/dMs/wilber.htm>) и из базы данных сектора «Петропавловск-цунами» Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Глубина очагов землетрясений – до 70 км. Для построения магнитудной шкалы $M_s(20R)$ отбирались только те землетрясения, для которых имелась оценка телесеismicкой магнитуды $M_s(20)$ в каталоге NEIC (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>),

диапазон магнитуд использованных землетрясений от 4.0 до 8.2. Для шкал $M_s(40)$ и $M_s(80)$ – те, для которых имелась оценка моментной магнитуды M_w в каталоге GCMT (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Диапазон магнитуд использованных землетрясений от 4.7 до 8.3. Для обработки исходной цифровой записи применялась программа DIMAS разработки Д.В. Дроздина [2].

Сейсмические станции и эпицентры землетрясений, записи которых были обработаны, представлены на рис. 1. Выделены две группы станций с разными калибровочными кривыми, условно названные: «континентальные» и «островодужные».

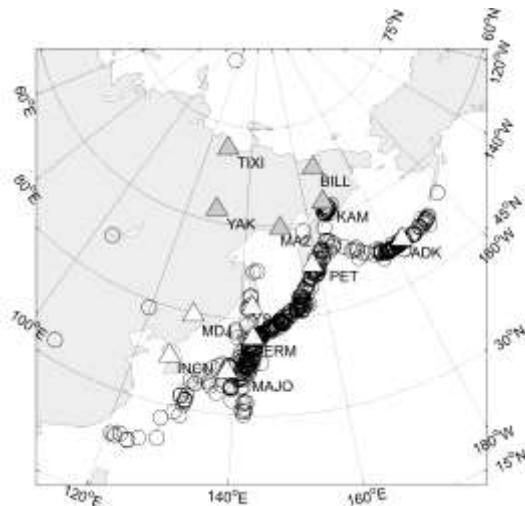


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений северо-западной части Тихоокеанского региона (кружки) и цифровых сейсмических станций (треугольники), использованных при построении калибровочных функций: серые треугольники – «континентальные» станции, белые – «островодужные»

Региональная шала магнитуд по поверхностным волнам $M_s(20R)$

Методика построения магнитудной шкалы $M_s(20R)$ версии 2014 г. подробно изложена в [10]. Первоначальные версии калибровочной функции шкалы $M_s(20R)$ [8] исходили из предположения согласования с «Пражской формулой» на эпицентральной расстоянии $\Delta = 20^\circ$ (рис. 2), 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 используется в настоящее время в Службе предупреждения о цунами (рис. 2). На рис. 3 приведен последний (2014 г.) вариант калибровочных функций.

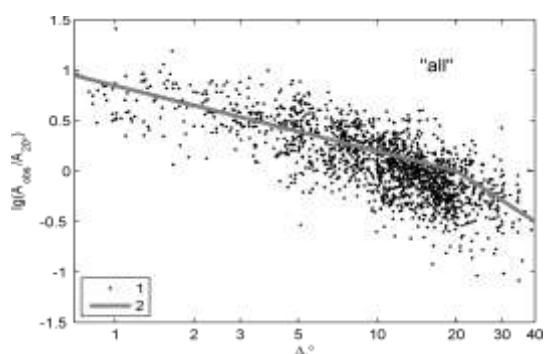


Рис. 2. Зависимость «приведенных амплитуд» поверхностных волн от расстояния для всех сейсмостанций: 1 – «приведенная» с.к. амплитуда; 2 – первоначальный вариант калибровочной кривой. Видно, что точки вблизи $\Delta = 20^\circ$ лежат ниже ломаной

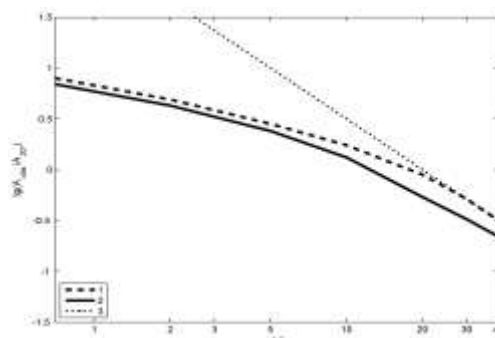


Рис. 3. Калибровочные функции в варианте 2014 г.: 1 – для «континентальных» станций; 2 – для «островодужных»; 3 – по «Пражской формуле»

Для шкалы $M_s(20R)$ получены невязки станционных оценок магнитуды относительно среднего по сети $\Delta M_{st} = M_s(20R)_{st} - M_s(20R)$ и невязки $\Delta M_{stN} = M_s(20R)_{st} - M_s(20)_{NEIC}$ относительно $M_s(20)_{NEIC}$. Дополнительно нашли невязки среднесетевой магнитуды $M_s(20R)$ относительно

магнитуды $M_s(20)_{NEIC}$, обозначенные ΔM_N . В статистику среднесетевых магнитуд включали лишь землетрясения, зарегистрированные не менее, чем двумя сейсмостанциями. Полученные данные приведены в Таблице 1 для сети в целом, а также отдельно для «островодужных» и «континентальных» групп станций.

Таблица 1. Параметры распределения средних невязок магнитуды

Тип станций	Число событий	Число стационарных данных	ΔM_{st}^*	ΔM_{stN}		ΔM_N	
			σ	μ	σ	μ	σ
Все	371	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	-0.01	0.17

Примечания: μ – среднее, σ – стандартное отклонение.

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» [6, 4]. Согласно регламенту, каждый РИОЦ ориентируется на определение магнитуды M_s_{BB} , по Ванеку-Соловьеву, полученной по своей одной опорной станции.

В период 2009–2011 гг. 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 (рис. 2). Магнитуда $M_s(20R)$ определяется как для поверхностных, так и для промежуточных и глубоких очагов землетрясений. С ноября 2016 года данные по $M_s(20R)$ вносятся в бюллетень станции «Петропавловск» [4].

В таблице 2 приводятся сведения об оценках $M_s(20R)$, полученных в РИОЦ Дальнего Востока.

Таблица 2. Количество полученных оценок $M_s(20R)$ в оперативной работе

РИОЦ	«Петропавловск»	«Южно-Сахалинск»	«Владивосток»
	2 712 (301)*	593 (294)*	1 273 (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.

В процессе внедрения магнитуды $M_s(20R)$ в РИОЦ «Петропавловск» выявились как преимущества, так и некоторые ее недостатки. Магнитуда $M_s(20R)$, наряду с классом K_s , на первом этапе являлась дополнительным контролем традиционной магнитуды M_s^{PET} при оперативной работе.

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. 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.

Магнитуду $M_s(20R)$ можно определить и в случае промежуточных или глубоких очагов землетрясений и получить дополнительную оценку моментной магнитуды M_w . В работе [9] была изучена зависимость разности $dM = M_s(20R) - M_w$ от H , глубины гипоцентра землетрясения. На основании зависимости $dM(H)$, путем введения поправок за глубину, можно получить оценку M_w . Например, для Жупановского землетрясения 30.01.2016г. $M_w = 7.2$ [7], оперативная оценка $M_s(20R) = 6.5$, что, с учетом глубины землетрясения, 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. Результаты, изложенные в работе [9], основаны на данных 55 землетрясений Дальнего Востока и требуют проверки на более представительном материале.

В целом, невязки сетевой магнитуды $M_s(20R)$ относительно магнитуды M_s^{NEIC} , полученные в РИОЦ «Петропавловск» [6] превосходят невязки, полученные в [10]. Это может быть объяснено использованием старого варианта калибровочной функции, а, возможно, и другим набором станций.

В настоящее время в программу «Dimas» обеспечена возможность перехода на новую версию калибровочной кривой для определения магнитуды $M_s(20R)$.

Региональные магнитудные шкалы по поверхностным волнам периодов 40 и 80 с

Методика построения магнитудных шкал $M_s(40)$ и $M_s(80)$ подробно изложена в [3].

Калибровочные кривые для магнитуд $M_s(40)$ и $M_s(80)$, вместе с наблюдаемыми данными представлены на рис. 4. Стандартное отклонение распределения невязок индивидуальных нормированных амплитуд составляет 0.20 для $M_s(40)$ и 0.25 для $M_s(80)$.

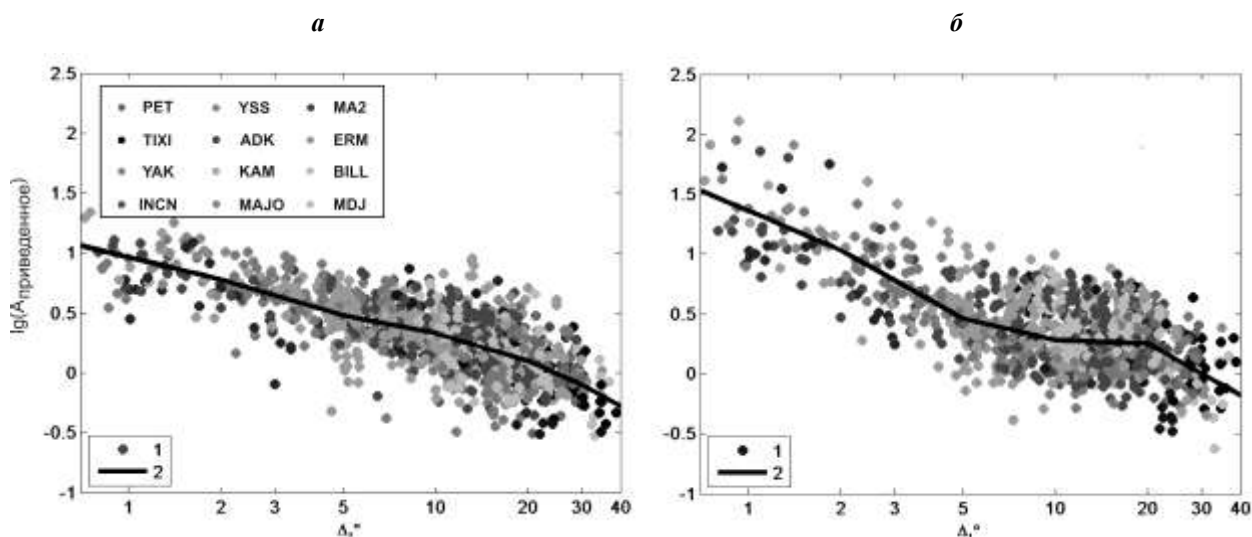


Рис. 4. Нормированные станционные амплитуды для магнитуд $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б): 1 – наблюдаемые данные, отображено нормированное среднеквадратичное значение амплитуд трех компонент; 2 – калибровочные функции для магнитуд $M_s(40)$ и $M_s(80)$

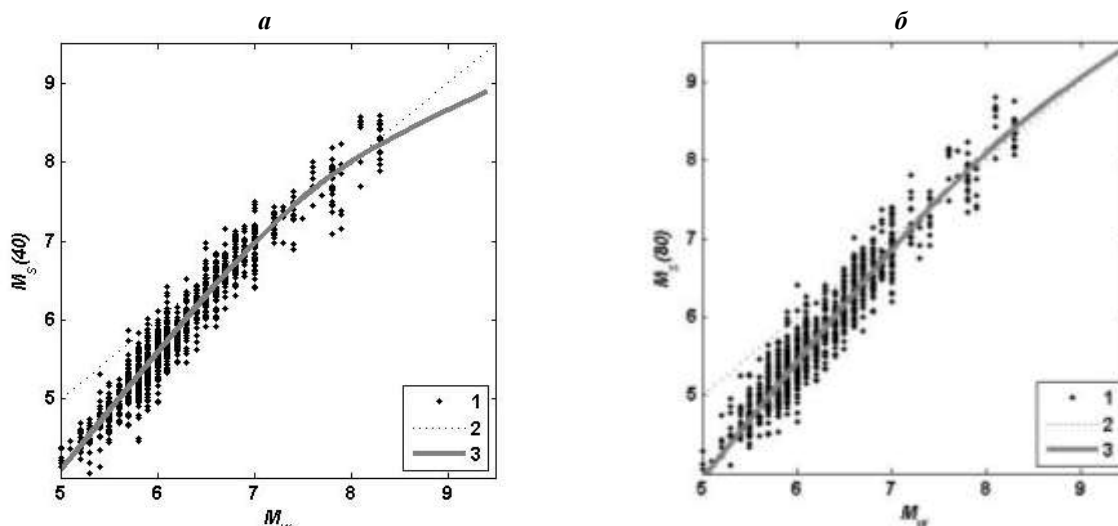


Рис. 5. Зависимость полученных оценок магнитуды землетрясений $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б) от магнитуды M_w : 1 – магнитуды землетрясений $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б), 2 – линия при равенстве $M_s(40)$ (а) и $M_s(80)$ (б) магнитуде M_w , 3 – калибровочная функция для магнитуд $M_s(40)$ и $M_s(80)$

Зависимость полученных оценок магнитуд от магнитуды M_w приведена на рис. 5. 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 $M_w > 9.2$), 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 и недостатки, 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. 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. Оттюк 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.
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., Оттюк Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОЦ «Петропавловск» в рамках Службы предупреждения цунами // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 299–303.
7. Чебров В.Н., Кугаенко 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. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 127–130.
10. Чубарова О.С., Гусев А.А. Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам для землетрясений Дальнего Востока России // Физика Земли. 2017. № 1. С. 60–71.