

УТОЧНЕННЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ МАГНИТУДНОЙ ШКАЛЫ $M_s(20R)$ И ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЧЕТА ГЛУБИНЫ ГИПОЦЕНТРА ПРИ ОЦЕНКЕ МАГНИТУДЫ

Чубарова О.С.¹, Гусев А.А.^{1,2}

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gusev@emsd.ru

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам $M_s(20R)$ представляет собой модификацию известных магнитудных шкал $M_s(20)$ Гутенберга и $M_s(BB)$ Соловьева. Эти стандартные шкалы обладают рядом несовершенств. Телесейсмическая магнитуда $M_s(20)$, основанная на классической магнитуде M_s Гутенберга [5], определяется по амплитудам волн с периодами 18-22 с и эпицентральных расстояний $20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$. Недостатком шкалы $M_s(20)$ является невозможность получать оценки $M_s(20)$ на региональных расстояниях, где невозможно увидеть волновой пакет с такими периодами. Широкополосная магнитуда $M_s(BB)$ [1] определена в широком диапазоне эпицентральных расстояний $2^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$, но не имеет четкой спектральной привязки и поэтому не вполне удобна для таких важных приложений, как оценка потенциала разрушительных волн цунами или анализ сильных движений грунта. Недостатки общепринятых шкал магнитуды по поверхностным волнам отмечались ранее [4, 6-9], причем предлагались различные варианты улучшенных калибровочных кривых.

Новая региональная магнитудная шкала $M_s(20R)$ использует амплитуды записи группы поперечных и поверхностных волн в узком диапазоне периодов (вблизи периода $T=20$ с), снимаемые после цифровой фильтрации в полосе 0.06-0.04 Гц. Такая фильтрация позволяет делать оперативные оценки магнитуды M_s , тесно связанные со значением спектра сейсмического момента на частоте $1/T=0.05$ Гц. Для мелкофокусных землетрясений такие оценки магнитуды оказались вполне приемлемыми. Однако, как хорошо известно, при заданном сейсмическом моменте оценка магнитуды M_s (по поверхностным волнам) существенно зависит от глубины очага. В работе изучается подобная зависимость для случая магнитуды $M_s(20R)$. Для этой цели построен ход с глубиной для разности значений магнитуд: M_w по GCMT и региональной $M_s(20R)$. Значения $M_s(20R)$ получены по уточненным в 2012 г калибровочным кривым, рекомендуемым для района Дальнего Востока, как вариант стандартной шкалы $M_s(20)$ для интервала расстояний 70- 4500 км. Ожидаемая зависимость от глубины была действительно обнаружена, однако ее масштаб оказался ограниченным, по-видимому, за счет существенного вклада поперечных волн в оценки $M_s(20R)$. Выявленные особенности целесообразно учитывать при оперативной оценке параметров очага землетрясения, в частности с точки зрения возможности возбуждения опасных цунами.

Региональная шкала магнитуд Шкала $M_s(20R)$ первоначально разрабатывалась для региональных эпицентральных расстояний, до $\Delta = 20^\circ$ (~2200км). Методика построения и первоначальные варианты калибровочных кривых приведены в [2, 3]. Там, в частности, отмечено наличие систематических расхождений в ходе затухания амплитуд для различных групп станций. Для учета этого факта станции региона были разделены на две группы: и "островодужные" (для большинства станций) и "континентальные", и построены две отдельные калибровочные кривые.

В дальнейшем было обнаружено, что в изучаемом регионе использование для эпицентральных расстояний $\Delta > 20^\circ$ стандартной телесейсмической калибровочной кривой ведет к заметным ошибкам. На рис.1. показана зависимость от расстояния максимальных амплитуд смещения, (среднеквадратических (далее- с.к.) по трем компонентам), нормированных к ожидаемой амплитуде по шкале M_s при $\Delta = 20$ («приведенных амплитуд») для всех сейсмостанций. Видно, что точки вблизи $\Delta = 20^\circ$ лежат ниже ломаной.

Для того чтобы снизить такие ошибки, "островодужная" калибровочная кривая шкалы $M_s(20R)$ продлена до расстояния 4500 км. Форма калибровочных кривых также была слегка уточнена. Расхождение старых и новых кривых не превышает 0.1. Помимо уже изученного интервала 70-2200 км, новая шкала $M_s(20R)$ может быть рекомендована также и для интервала расстояний 2200-4500

км. В этом интервале использование новой шкалы для "островодужных" станций изученного региона позволило бы получить уточненные (в сравнении со стандартной шкалой) оценки $M_S(20)$. Использование стандартной шкалы занижает здесь значение $M_S(20)$ до 0.2 (относительно среднего по мировой сети). Для "континентальных" станций стандартная калибровочная кривая в интервале 2200-4500 км вполне приемлема.

Уточненные (версия 2013 г) калибровочные функции для определения магнитуды $M_S(20R)$

Магнитуда $M_S(20R)$ определяется следующим образом:

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

где $\sigma(\Delta)$ – калибровочная функция в традиционной записи, $\sigma^*(\Delta)$ - модифицированная калибровочная функция, численно определяемая по приведенному ниже алгоритму, Δ - эпицентральное расстояние в градусах, $0.7 \leq \Delta \leq 40$, A – с. к. (по трем компонентам) значение максимальной «двойной амплитуды» смещения в поверхностной волне на выходе фильтра в мкм во временном окне $[t_s, t_s+600\text{с}]$, t_s – время вступления S-волны, $T = 20$ с. Обмер амплитуд не синхронизирован между компонентами. Рекомендуются два варианта калибровочных функций, каждый из которых предназначен для одной из двух групп сейсмических станций.

(1) Станции, расположенные в зоне СЗ Тихого океана и его окраин, включая станции Муданьджан и Магадан; их условное краткое название "островодужные". Список изученных станций такого рода включает PET, ADK, MA2, YSS, MDJ, INCN, ERM, MAJO. Для них предлагается калибровочная функция $\sigma_2^*(\Delta)$.

(2) Станции, расположенные на дистанциях 800 км и более от окраинных морей Тихого океана; их условное краткое название "континентальные". Список изученных станций такого рода включает КАМ (KMSK), TIXI, BILL, YAK. Для них предлагается калибровочная функция $\sigma_1^*(\Delta)$. Калибровочные функции задаются следующей таблицей:

Параметры	Узловое значение Δ , градусы						
	0.7	2	5	10	20	30	40
$\lg(\Delta)$	-0.1549	0.3010	0.6990	1.0000	1.3010	1.4771	1.6021
$\sigma_1^*(\Delta)$	0.90	0.69	0.45	0.24	-0.05	-0.29	-0.50
$\sigma_2^*(\Delta)$	0.84	0.63	0.38	0.12	-0.27	-0.49	-0.66

Для отдельной сейсмической станции численные значения калибровочных функций $\sigma^*(\Delta)$ для определения магнитуды $M_S(20R)$ определяются по данным таблицы, используя линейную интерполяцию по аргументу $\lg(\Delta)$. Функции определены только внутри интервала $0.7 \leq \Delta \leq 40$

На рис 2. представлены калибровочные функции для магнитуды $M_S(20R)$, а также калибровочная функция по «Празжской формуле»[2]. На рис. 3 представлены гистограммы невязок трех родов: a – внутрисетевые, т.е. невязки станционных оценок магнитуды $M_S(20R)$; или M_{sta} , относительно среднего по сети значения $M_S(20R)$; b – невязки станционных оценок магнитуды M_{sta} относительно магнитуды $M_S(20)$ NEIC; c – то же, но учитывались лишь землетрясения, зарегистрированные не менее, чем двумя станциями. Средние значения невязок все ниже 0.01

Зависимость от глубины разности магнитуд $M_S(20R)$ и M_W

Для исследования путей характеристики очага глубокого землетрясения по значению $M_S(20)$ изучали поведение разностей $dM = M_S(20R) - M_W$. На рис. 4 показаны станции и эпицентры 55 землетрясений с глубиной очагов $H=76-656$ км и $M_W = 5.4-8.3$, добавленных к ранее изученному объему материала по мелкофокусным очагам. На рис 5 приведены наблюдаемые значения dM - средние по станциям для отдельных очагов. Видно, что глубже 100 км функция $dM(H)$ стабилизируется. На рис.6 отображена оценка функции $dM(H)$, полученная с. к. сплайн-аппроксимацией линейными сплайнами; с. к. невязка составила 0.26.

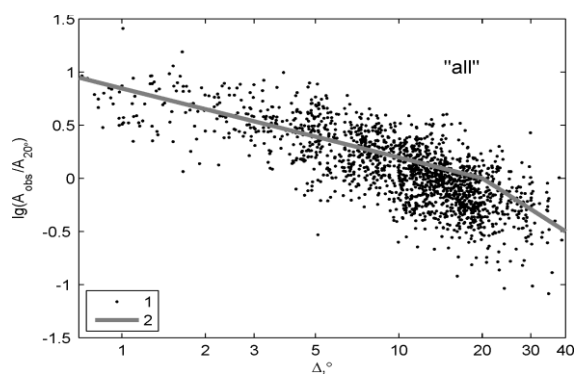


Рис.1. Зависимость «приведенных амплитуд» поверхностных волн от расстояния для всех сейсмостанций. 1 «приведенная» с.к. амплитуда; 2 - первоначальный вариант калибровочной кривой. Видно, что точки вблизи $\Delta = 20$ лежат ниже ломаной

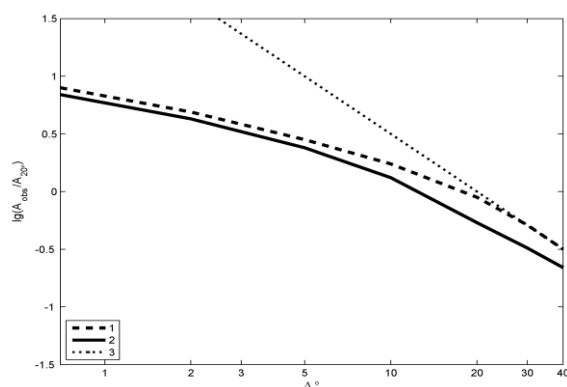


Рис.2. Калибровочные функции: 1 - для «континентальных» станций; 2 - для «островодужных»; 3 - по «Пражской формуле».

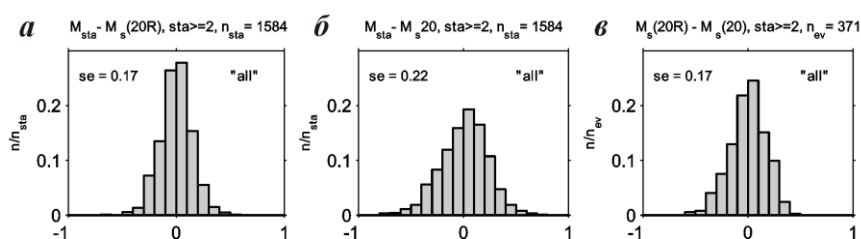


Рис. 3. Гистограммы невязок: *a* – внутрисетевые, *б* – относительно $M_s(20)$; *в*- средняя по сети $M_s(20R)$ относительно $M_s(20)$.

Значения $dM(H)$ сведены в таблицу:

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

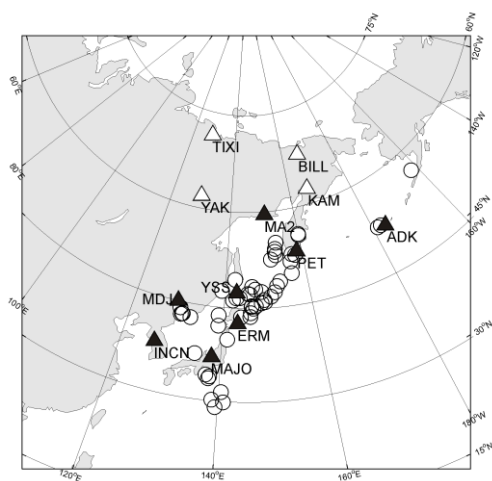
Таким образом, выявлен общий характер поведения функции $dM(H)$. Для интервала 0-70 км наклон тренда составляет примерно 0.056 1/км, эта цифра составляет менее трети от теоретической оценки 0.0174 1/км, полученной в [7] для интервала глубин 10 -80 км.

Отрицательное среднее абсолютное значение величины $dM(H)$ около -0.4 в интервале 0-70 км (т.е. для мелкофокусных землетрясений) указывает, что связь между M_s и M_w не непосредственная, этот факт требует дальнейшего изучения. Уже полученные результаты позволяют ожидать, что в перспективе будет получена возможность уточнения оперативной оценки магнитуды промежуточных и глубоких землетрясения по данным поверхностных волн. Важно наличие заметного тренда (размах около 0.50 единицы) для мелкофокусных землетрясений, что может оказаться важным в задаче оперативной оценки цунамиопасности. Масштаб вариаций $dM(H)$ оказался ограниченным, по-видимому, за счет существенного вклада поперечных волн в оценки $M_s(20R)$.

Заключение

Уточнены калибровочные функции шкалы магнитуд $M_s(20R)$, которая позволяет получить устойчивую при обмере, спектрально четко определенную оценку магнитуды на региональных расстояниях, и позволяет сохранить историческую преемственность с классической шкалой Гутенберга M_s . Использование новой шкалы $M_s(20R)$ для изученного региона в интервале эпицентральных расстояний 2200 – 4500 км может быть рекомендовано как уточнение для этого диапазона расстояний стандартной шкалы $M_s(20)$. Получен первый вариант зависимости магнитуды по поверхностным волнам от глубины при фиксированном сейсмическом моменте. После доработки будет создана возможность уточнения оперативной оценки магнитуды промежуточных и глубоких землетрясения на Дальнем Востоке России по данным поверхностных волн.

Авторы признательны Г.М. Бахтиаровой, С.А. Викулиной, М.Я. Малкиной, А.Ю. Чебровой и В.А. Zubовой за помощь в подборе и подготовке данных



○ - эпицентр землетрясения
 Сейсмические станции:
 ▲ - “островодужные”
 △ - “континентальные”

Рис.4. Эпицентры промежуточных и глубоких землетрясений 1993-2013 гг. и цифровые сейсмостанции.

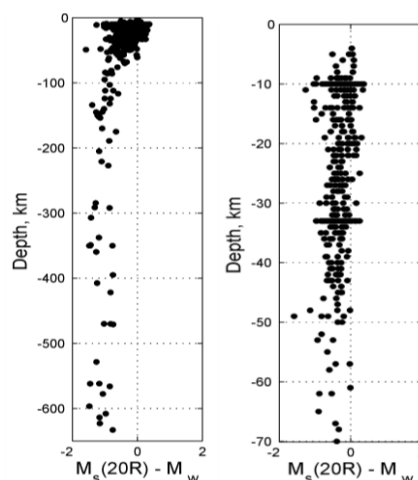


Рис.5. Зависимость dM от глубины H : слева - для землетрясений всего диапазона глубин; справа - для землетрясений с глубиной до 70 км.

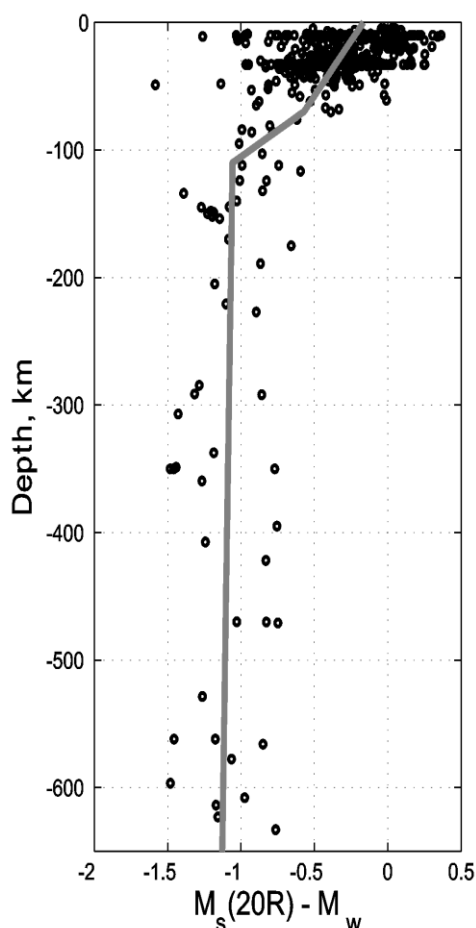


Рис. 6. Значения dM и аппроксимация этой зависимости $dM(H)$ линейными сплайнами.

Список литературы

1. Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Шебалин Н.В. Стандартная шкала магнитуд // Изв. АН СССР. сер. геофизич. 1962, № 2. С. 153 – 158.
2. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двдцатисекундная региональная магнитуда $M_s(20R)$ для Дальнего Востока России // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. Доклады научного симпозиума. 1-4 июня 2010, г. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 299-301.
3. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двдцатисекундная региональная магнитуда $M_s(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. №3. С. 58-63.
4. Evernden J.F. Variation of Rayleigh-wave amplitude with distance // Bull. Seism. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 231-240
5. Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitude of shallow earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am. 1945. V. 35. P. 3-12
6. Herak M., Herak D. Distance dependence of M_s and calibration function for 20-second Rayleigh waves // Bull. Seism. Soc. Am. 1993. V. 83. P. 1881-1892.
7. 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
8. Romanelli F., Panza G. F. Effect of source depth correction on the estimation of earthquake size // Geoph. Res. Lett. 1995. V.9. P. 1017-1019.
9. von Seggern D. Amplitude-distance relation for 20-second Rayleigh waves // Bull. Seism. Soc. Am. 1977. V. 67. P. 405-411.