

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

Чубарова О.С.<sup>1</sup>, Гусев А.А.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> 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. Телесеismicкая 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 телесеismicкой 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,  $\Delta$  - 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  $[t_s, t_s+600c]$ ,  $t_s$  – 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 РЕТ, АДК, МА2, 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), ТИХИ, BILL, YAK. Для них предлагается калибровочная функция  $\sigma_1^*(\Delta)$ . Калибровочные функции задаются следующей таблицей:

Параметры	Узловое значение $\Delta$ , 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 «Пражской 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.

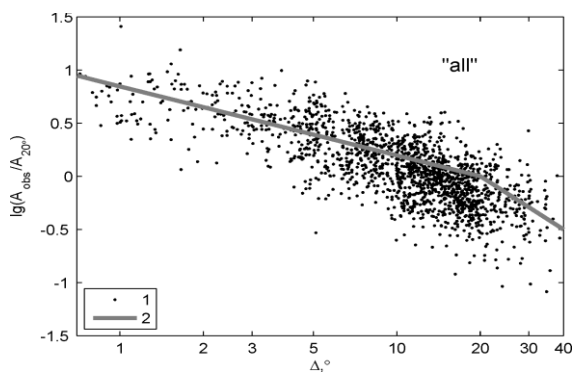


Рис.1. Зависимость «приведенных амплитуд» поверхностных волн от расстояния для всех сейсмостанций. 1 «приведенная» с.к. амплитуда; 2 - первоначальный вариант калибровочной кривой. Видно, что точки вблизи  $\Delta = 20$  лежат ниже ломаной

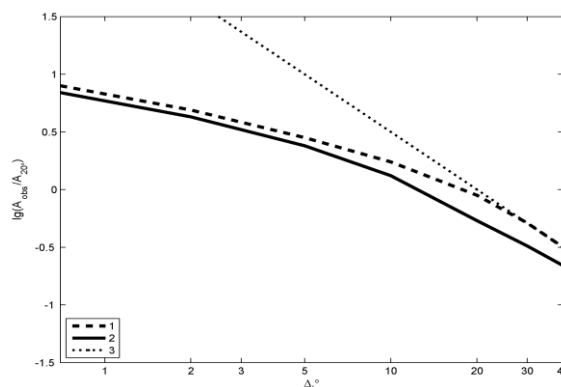


Рис.2. Калибровочные функции: 1 - для «континентальных» станций; 2 – для «островодужных»; 3 - по «Пражской формуле».

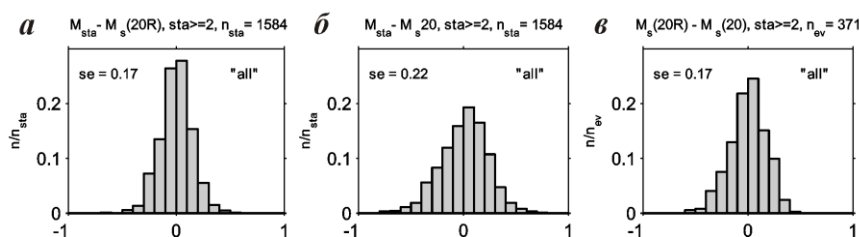


Рис. 3. Гистограммы невязок: а – внутрисетевые, б – относительно  $M_s(20)$ ; в- средняя по сети  $M_s(20R)$  относительно  $M_s(20)$ .

Значения  $dM(H)$  сведены в таблицу:

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

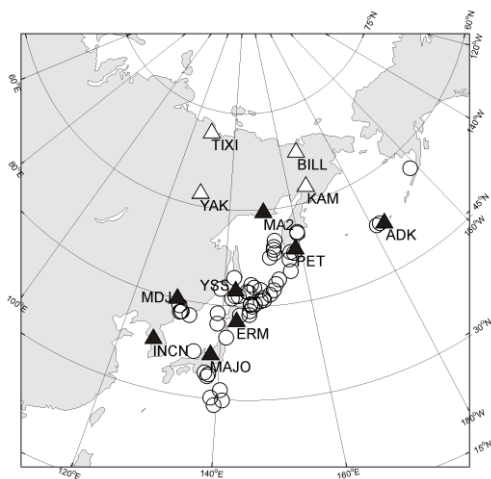
Таким образом, выявлен общий характер поведения функции  $dM(H)$ . Для интервала 0-70 км наклон тренда составляет примерно 0.056 1/км, эта цифра составляет менее трети от теоретической оценки 0.0174 1/км, полученной в [7] для интервала глубин 10 -80 км.

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.

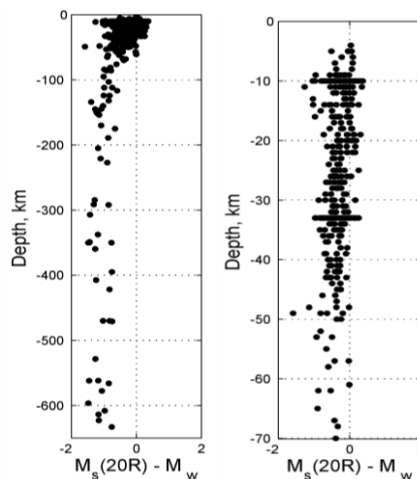


Рис.5. Зависимость  $dM$  от глубины  $H$ : слева - для землетрясений всего диапазона глубин; справа - для землетрясений с глубиной до 70 км.

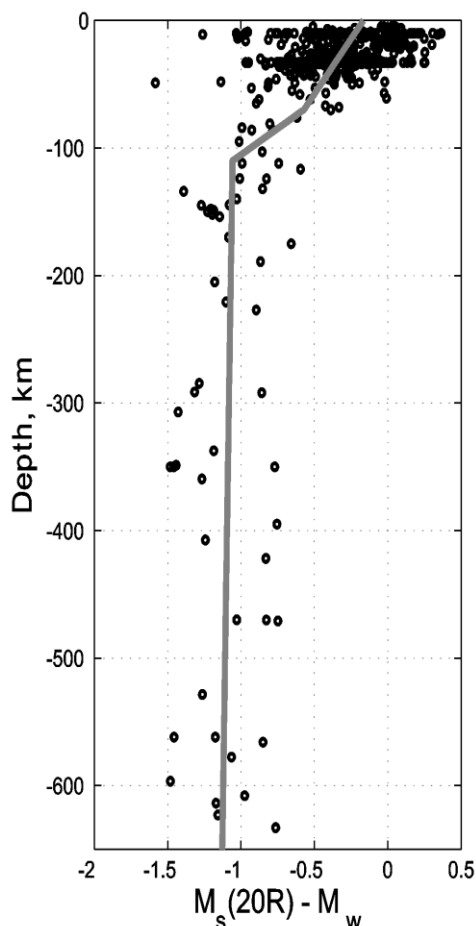


Рис. 6. Значения  $dM$  и аппроксимация этой зависимости  $dM(H)$  линейными сплайнами.

#### 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. Двадцатисекундная 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. Двадцатисекундная 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.