

УДК 550.34.042.43

Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_S(20R)$ для Дальнего Востока России

© 2010 г. О.С. Чубарова¹, А.А. Гусев^{1,2}, С.А. Викулина²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

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

Описана новая модифицированная шкала магнитуд $M_S(20R)$, позволяющая продлить на малые эпицентральные расстояния телесеismicкую шкалу магнитуд $M_S(20)$. Для построения шкалы использованы цифровые записи 392 землетрясений северо-западной части Тихоокеанского региона периода 1993–2008 гг. на 12 сейсмических станциях. Новая шкала опирается на амплитуды поверхностных волн узкого диапазона периодов 16–25 с вблизи периода 20 с для эпицентральных расстояний от 80 до 3000 км. Выделение диапазона периодов производится путем использования полосового цифрового фильтра. На основании выявленных региональных особенностей затухания сейсмических волн с расстоянием все станции региона были разделены на две группы: “континентальные” и “островодужные”. Для каждой группы станций предлагается своя калибровочная кривая. Для учета локальных условий вводятся станционные поправки.

Шкала магнитуд $M_S(20R)$ делает возможным получить спектрально определенную оценку магнитуды на региональных расстояниях и позволяет сохранить историческую преемственность с классической шкалой Гутенберга M_S . Среднеквадратическая ошибка определения $M_S(20R)$ по одной станции составляет 0.22.

Ключевые слова: землетрясение, шкала магнитуд, поверхностные волны.

Введение

Необходимость построения нового варианта шкалы магнитуд вызвана тем, что стандартные шкалы определения магнитуд по поверхностным волнам $M_S(20)$ и $M_S(BB)$ обладают рядом недостатков. Телесеismicкая магнитуда $M_S(20)$, основанная на классической магнитуде M_S Б. Гутенберга [Gutenberg, 1945], определена для периодов волн 18–22 с и эпицентральных расстояний $20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$. Недостатком является невозможность получать оценки $M_S(20)$ на региональных расстояниях. Широкополосная магнитуда $M_S(BB)$ [Ванек и др., 1962] 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 [Evernden, 1971; von Seggern, 1977; Panza et al., 1989; Herak M., Herak D., 1993], причем предлагались различные варианты улучшенных калибровочных кривых.

Новая модифицированная шкала магнитуд $M_S(20R)$ позволяет продлить на малые эпицентральные расстояния телесеismicкую шкалу $M_S(20)$. Шкала опирается на амплитуды поверхностных волн узкого диапазона периодов (16–25 с) вблизи периода 20 с для эпицентральных расстояний от 80 до 3000 км. Выделение диапазона периодов производится путем использования цифрового фильтра.

Использованные данные и методика построения калибровочной кривой для шкалы магнитуд $M_S(20R)$

В работе использованы цифровые записи 392 землетрясений северо-западной части Тихоокеанского региона периода 1993–2008 гг. на 12 сейсмических станциях (РЕТ,

YSS, MA2, YAK, KAM, ADK, TIXI, BILL, MDJ, INCN, ERM, MAJO), всего 1476 трехкомпонентных записей широкополосных каналов ВН. Цифровые записи землетрясений выбирались из архива IRIS DMC (<http://www.iris.edu/dms/wilber.htm>) и из базы данных цунами КФ ГС РАН. Глубина очагов землетрясений – до 70 км. Отбирались только те землетрясения, для которых имелась оценка телесеismicической магнитуды $M_S(20)$ в каталоге PDE NEIC (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>). Для обработки исходной цифровой записи применялась программа DIMAS сотрудника КФ ГС РАН Д.В. Дроздина.

Сейсмические станции и эпицентры землетрясений, записи которых были обработаны, представлены на рис. 1.

Для построения калибровочной кривой рассматривалась зависимость от расстояния максимальных амплитуд смещения в поверхностных волнах, выделенных полосовым фильтром с осевой частотой 0.05 Гц. Физически реализуемый фильтр Баттерворта четвертого порядка имел частоты среза 0.0625 и 0.04 Гц (периоды 16–25 с). Измеренные амплитуды нормировали на ожидаемую амплитуду от данного землетрясения на эпицентральной расстоянии $\Delta = 20^\circ$, согласно фактическому значению телесеismicической магнитуды $M_S(20)$ по каталогу NEIC (рис. 2). Максимальные амплитуды измерялись во временном окне $[t_S, t_S+600 \text{ с}]$, где t_S – время вступления S-волны. Максимальные значения на трех каналах измерялись в независимые моменты времени.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость приведенных максимальных амплитуд смещения ($A_{\text{obs}}/A_{20^\circ}$) от эпицентрального расстояния Δ для всех трех компонент записей. Здесь же для интервала расстояний $0.7^\circ < \Delta < 20^\circ$ изображен первоначальный вариант новой калибровочной кривой $Q_1(\Delta)$. Согласно этой аппроксимации, амплитуда 20-секундных поверхностных волн спадает в интервале $0.7^\circ < \Delta < 20^\circ$ как $Q(\Delta) \sim \Delta^{-0.65}$. Сегмент калибровочной кривой при $\Delta > 20^\circ$ – стандартный спад амплитуд при $\Delta > 20^\circ$ как $\Delta^{-1.66}$ по Гутенбергу – Соловьеву.

Для оценки качества аппроксимации тренда амплитуд с расстоянием были рассмотрены невязки стационарных оценок магнитуды от расстояния. Предварительно были

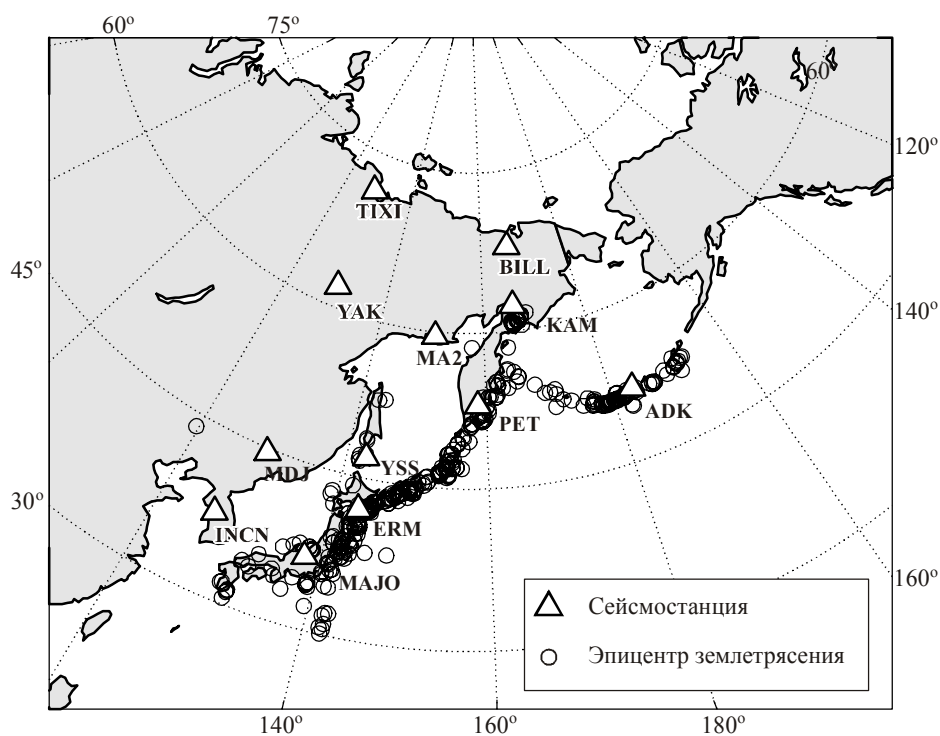


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 1993–2008 гг. северо-западной части Тихоокеанского региона и цифровых сейсмических станций, использованных для построения калибровочной кривой

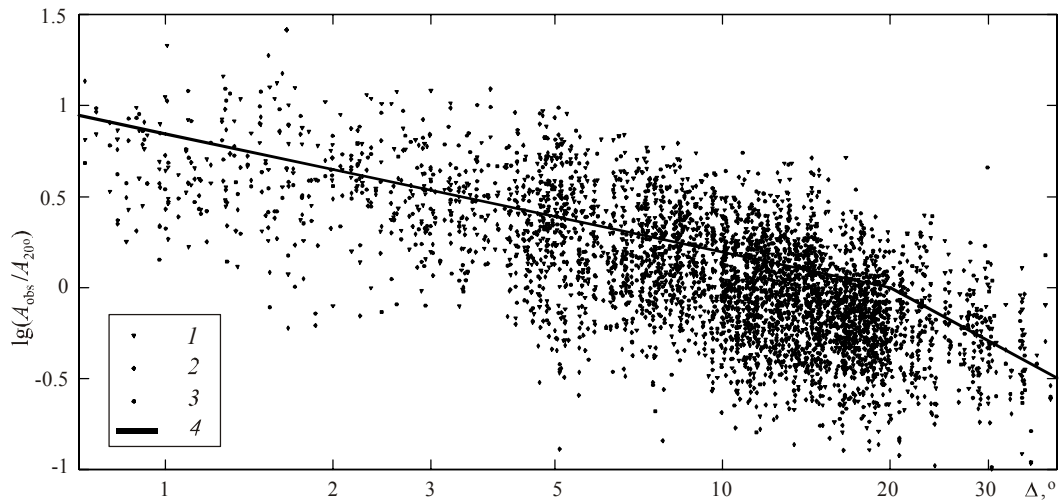


Рис. 2. Наблюдаемое максимальное смещение в профильтрованной поверхностной волне, приведенное к значению единица при эпицентральной дистанции $\Delta = 20^\circ$ на основе $M_S(20)$ данного землетрясения, как функция эпицентральной дистанции

1–3 – компоненты: 1 – E , 2 – N , 3 – Z ; 4 – вариант $Q_1(\Delta)$ калибровочной кривой

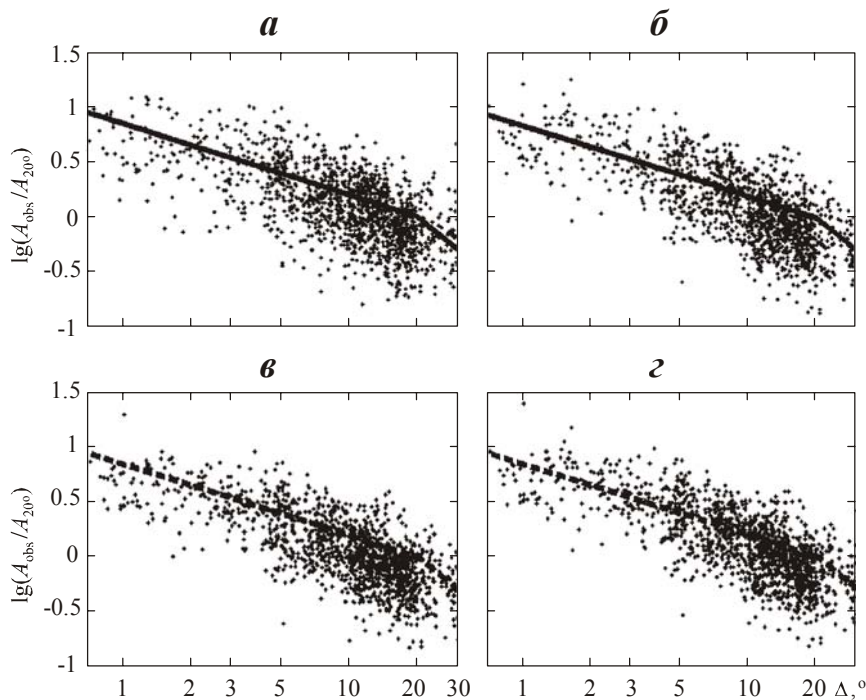


Рис. 3. Приведенная максимальная амплитуда смещения в профильтрованной поверхностной волне как функция эпицентральной дистанции. Точки – результаты различных вариантов отбора и осреднения станционных данных, сплошная линия – калибровочная кривая $Q_1(\Delta)$

a – вертикальная компонента Z ; $б$, $г$ – среднеквадратическое значение: $б$ – горизонтальных компонент E , N , $г$ – трех компонент E , N , Z ; $в$ – среднее значение логарифмов трех компонент E , N , Z

рассмотрены различные варианты отбора и осреднения станционных данных (рис. 3). В результате станционные магнитуды рассчитывались на основании среднеквадратического значения приведенных максимальных амплитуд трех компонент (максимумы измерялись в независимые моменты времени). Такая методика объединения амплитудных данных по компонентам и типам волн оказалась наиболее приемлемой. При расчете не-

вызок в качестве “истинной” рассматривалась телесеismicкая оценка магнитуды данного землетрясения $M_S(20)$ по каталогу NEIC.

Опробование первоначального варианта шкалы на данных отдельных сейсмостанций

После опробования первоначального варианта магнитудной шкалы на данных отдельных сейсмостанций выявились региональные особенности затухания seismicческих волн с расстоянием. Все станции региона удалось разделить на две большие, географически выделенные группы, далее обозначаемые как: “континентальные” и “островодужные”. Для основной “островодужной” группы предложена калибровочная кривая $Q_2(\Delta)$, для “континентальной” группы оптимальной оказалась первоначальная калибровочная кривая $Q_1(\Delta)$. Различие между кривыми невелико и имеет место только в ограниченном диапазоне расстояний 7–27 с, максимальное расхождение достигает 0.10.

Также обнаружилась целесообразность введения постоянных станционных поправок для учета небольших амплитудных аномалий некоторых сейсмостанций. Полученные оценки станционных поправок приведены в таблице.

Характеристики распределения станционных невязок магнитуды и принятые станционные поправки d_{sta}

Сейсмостанция	Число событий	Медиана	Среднее	Стандартное отклонение	Принятая поправка d_{sta}
“Островодужные” станции					
PET	283	-0.07	-0.08	0.20	0.1
YSS	256	-0.01	-0.03	0.24	-
MA2	59	-0.01	-0.05	0.25	-
ADK	76	-0.06	-0.07	0.19	0.1
ERM	113	0.05	0.04	0.27	-
INCN	113	-0.01	-0.04	0.22	-
MAJO	220	-0.12	-0.12	0.22	0.1
MDJ	144	-0.04	-0.05	0.20	-
“Континентальные” станции					
BILL	28	-0.05	0.00	0.20	-
TIXI	6	-0.10	-0.07	[0.10]	-
YAK	24	0.04	-0.03	0.20	-
KAM	28	0.04	-0.01	0.20	-

Таким образом, оценку магнитуды $M_S(20R)$ предлагается производить по следующему алгоритму.

Для “континентальных” станций (KAM, TIXI, BILL, YAK):

$$M_S(20R) = \begin{cases} \text{Не определена} & (\Delta < 0.7^\circ) \\ \lg(A/T) + 0.65 \lg \Delta + 4.61 + d_{sta} & (0.7^\circ \leq \Delta \leq 20^\circ), \\ \lg(A/T) + 1.66 \lg \Delta + 3.30 + d_{sta} & (\Delta > 20^\circ) \end{cases}$$

где Δ – эпицентральное расстояние в градусах; A – максимальная амплитуда смещения в поверхностной волне на выходе фильтра (мкм) во временном окне $[t_s, t_s+600 \text{ с}]$ (t_s – время вступления S -волны); $T = 20 \text{ с}$; d_{sta} – станционная поправка.

Для “островодужных” станций (PET, ADK, MA2, YSS, MDJ, INCN, ERM, MAJO):

$$M_S(20R) = \begin{cases} \text{Не определена} & (\Delta < 0.7^\circ) \\ \lg(A/T) + 0.65 \lg \Delta + 4.614 + d_{sta} & (0.7^\circ \leq \Delta < 7^\circ) \\ \lg(A/T) + 0.87 \lg \Delta + 4.429 + d_{sta} & (7^\circ \leq \Delta \leq 27^\circ) \\ \lg(A/T) + 1.66 \lg \Delta + 3.30 + d_{sta} & (\Delta > 27^\circ) \end{cases}$$

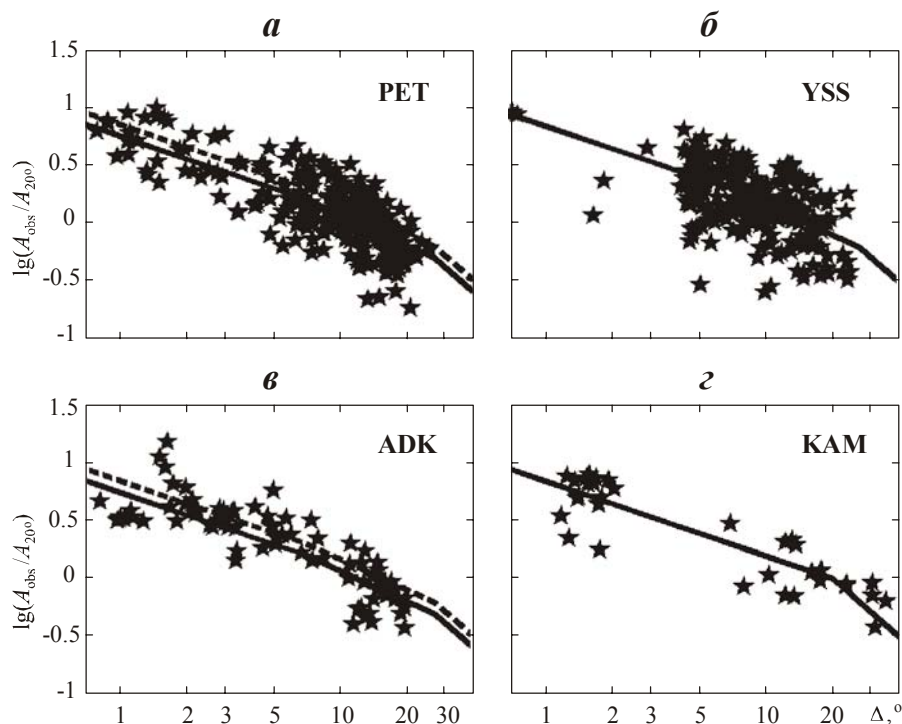


Рис. 4. Зависимости приведенных максимальных амплитуд смещения от расстояния для “островодужных” сейсмостанций PET (а), YSS (б), ADK (в) и “континентальной” сейсмостанции КАМ (г). Показано среднеквадратическое значение трех компонент. Сплошные линии – калибровочные кривые $Q_2(\Delta)$ (для а, б и в) и $Q_1(\Delta)$ (для г). Для станций PET и ADK пунктиром показаны калибровочные кривые до введения станционных поправок

Представленные на рис. 4 зависимости приведенных максимальных амплитуд смещения от расстояния для нескольких сейсмостанций показывают, что данные достаточно приемлемо согласуются с разработанными калибровочными кривыми.

Стандартное отклонение оценок новой магнитуды $M_S(20R)$ от принятых калибровочных кривых составляет в среднем 0.22, а по данным отдельных сейсмостанций 0.20–0.27 (см. таблицу), что согласуется с типичными значениями точности станционных оценок магнитуды по поверхностным волнам.

Заключение

Предлагаемую методику обмера и калибровочные кривые в условиях северо-западной части Тихоокеанского региона можно считать приемлемым приближением к спектрально устойчивой региональной магнитудной шкале по поверхностным волнам. Важно, что делается возможным систематическое определение спектрально определенной магнитуды для слабых землетрясений магнитудного диапазона 3.5–5. В этом случае такая магнитуда позволяет построить быструю и мало искаженную оценку моментной магнитуды M_W (не совпадая с ней!). Полученный результат позволит существенно улучшить описание очагов землетрясений Дальнего Востока России. Можно полагать, что основанная на новой калибровке методика будет применима и в других регионах России и мира.

Благодарности

Авторы признательны Г.М. Бахтияровой и А.Ю. Чебровой за участие в подборе данных и М.Я. Малкиной за техническую помощь. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00775).

Литература

- Ванек И., Затонек 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. геофиз. 1962. № 2. С.153–158.
- Alewine R.W. III Theoretical and observed distance corrections for Reyleigh-wave magnitude // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1972. V. 62. P.1611–1619.
- Evernden J.F. Variation of Rayleigh-wave amplitude with distance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1971. V. 61. P.231–240.
- Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitude of shallow earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1945. V. 35. P.3–12.
- Herak M., Herak D. Distance dependence of M_S and calibration function for 20-second Rayleigh waves // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1993. V. 83. P.1881–1892.
- 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.
- von Seggern D. Amplitude-distance relation for 20-second Rayleigh waves // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1977. V. 67. P.405–411.

Сведения об авторах

ЧУБАРОВА Ольга Сергеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: (415)229-77-42. E-mail: ochubarova@emsd.ru, svchub@gmail.com

ГУСЕВ Александр Александрович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; главный научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: (415)243-18-57. E-mail: gusev@emsd.ru

ВИКУЛИНА Светлана Алексеевна – научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: (415)242-54-82. E-mail: vikulina.svetlana@gmail.com

The 20-sec regional magnitude for the Russian Far East

O.S. Chubarova¹, A.A. Gusev^{1,2}, S.A. Vikulina²

¹ *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

² *Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract. A new modified magnitude scale $M_S(20R)$ is constructed that permits to extend the teleseismic magnitude scale $M_S(20)$ to the regional epicenter distances. The data set used in this study contains digital records of 392 earthquakes of the Northwest part of Pacific region of the period of 1993–2008 at 12 seismic stations. The new scale is based on amplitudes of surface waves of a narrow range of the periods (16–25 s) near to the period of 20 s for distances of 80–3000 km. The digital Butterworth filter is used for processing. On the basis of the revealed regional features of seismic wave attenuation with distance all stations of region have been divided into two groups: “continental” and “island-arc”. For each group of stations its own calibration function is proposed. Individual station corrections are used to compensate for the local features.

Magnitude scale $M_S(20R)$ makes possible to get spectral-determined magnitude estimation on the regional distances and allow to provide historical continuity with Gutenberg's M_S classical scale. Single-station rms accuracy of determination of $M_S(20R)$ is 0.22.

Keywords: earthquake, magnitude scale, surface waves.