

Инструкция по расчету оценок магнитуды $M_s(20R)$ - уточненная версия 2012 г

*Составители: д.ф.-м.н. А.А.Гусев, к.ф.-м.н О.С.Чубарова,
ИВиС ДВО РАН, 2012 г*

Введение

Шкала магнитуд $M_s(20R)$ разработана в 2009-2010 гг. как модификация известных магнитудных шкал $M_s(20)$ и $M_s(BB)$ для сравнительной оценки мощности очагов землетрясений. Шкала $M_s(20)$ – основная в сейсмической службе США NEIC, использует амплитуды поверхностных волн Релея. Следуя Гутенбергу, она использует амплитуды, максимальные в пределах заданного неширокого диапазона видимых периодов 17-23 с. Для получения шкалы с столь четкой спектральной привязкой в области 0.05 Гц (период около 20 с) используется факт дисперсии поверхностных волн. Затухание амплитуд с расстоянием принято по калибровочной кривой Соловьева-Ванека («Пражская формула 1962 г»). Основным минусом шкалы $M_s(20)$ – невозможность ее использования на малых эпицентральных расстояниях (менее 20°), где эффекты дисперсии еще не проявились в достаточной мере.

Шкала $M_s(BB)$ – основная в российской сейсмической службе, использует максимальную видимую амплитуду поверхностных волн Релея на эпицентральных расстояниях от 2° , на вертикальной компоненте записи. Ранее называлась MLZ, кроме того, ЕССН СССР долго использовала численно практически совпадающую с MLZ шкалу MLH, использующую максимум амплитуды поверхностных волн на горизонтальных компонентах. Шкала $M_s(BB)$ использует фактически наблюдаемый видимый период поверхностных волн, который на малых расстояниях $2-3^\circ$ обычно составляет 3-5 с. С ростом расстояния наблюдаемый видимый период достигает 20 с и более. В среднем, на расстояниях более 20° шкалы $M_s(20)$ и $M_s(BB)$ неплохо согласуются. Согласованность оценок $M_s(BB)$ между близкими и удаленными станциями неявно опирается на определенную типичную форму очагового спектра землетрясения; случаи несогласованности за счет спектральных особенностей нередки. Основные минусы шкалы $M_s(BB)$: (1) нечеткая спектральная привязка, что ведет к неудобствам для таких важных приложений, как оценка потенциала

разрушительных волн цунами или анализ сильных движений грунта; и (2) трудности аккуратного обмера видимого периода и снятия амплитуды на малых эпицентральных расстояниях, когда приходится использовать короткий широкополосный волновой цуг, который к тому же часто трудно отделить от группы поперечных волн.

Новая модификация шкалы M_s , далее обозначаемая, $M_s(20R)$ позволяет иметь на малых эпицентральных расстояниях магнитудную шкалу, вполне согласующуюся с телесейсмической шкалой $M_s(20)$ и переходящую в нее на больших расстояниях.. Шкала опирается на амплитуды поверхностных волн узкого диапазона периодов (16-25 с) вблизи периода 20 с и покрывает диапазон эпицентральных расстояний от 80 до 2200 км. Выделение диапазона периодов производится путем использования цифрового фильтра. Обнаружилось, что в изучаемом районе калибровка по «Пражской формуле» ведет к заметным ошибкам также и на расстояниях более 2200 км. Для того, чтобы снизить такие ошибки, шкала $M_s(20R)$ продлена до расстояния 4500 км. Ее использование для изученного региона в интервале 2200-4500 км может быть рекомендовано как уточнение стандартной шкалы $M_s(20)$. Использование фильтрации в этом интервале расстояний практического значения не имеет, так как для расстояний более 20° эффект цифрового фильтра быстро становится пренебрежимо мал, поскольку полностью включается «природная» фильтрация за счет дисперсии поверхностных волн.

Шкала магнитуд $M_s(20R)$ позволяет получить устойчивую при обмере, спектрально четко определенную оценку магнитуды на региональных расстояниях, и позволяет сохранить историческую преемственность с классической шкалой Гутенберга M_s .

Настоящий вариант шкалы несколько уточняет первый вариант 2010 г.

Шаги процедуры оценки $M_s(20R)$

1. Выбор участка трехкомпонентной записи землетрясения на одной или ряде станций на широкополосных каналах велосиграфов (обычно на каналах ВН в практике IRIS) для дальнейшего обмера. Эпицентральное расстояние должно составлять не менее 0.7° . Одновременно с участком записи землетрясения необходимо иметь не менее 3 мин записи перед вступлением Р для суждения об уровне шума/помех при обмере амплитуд. Предполагается, что до начала данной процедуры имеются оценки времен вступления Р и S-волны, а также известно эпицентральное расстояние. До всяких измерений следует обязательно проверить, нет ли на записи чувствительного канала (обычно канала ВН) искажений за счет насыщения АЦП («зашкал амплитуд», клипирование). При возможности следует всегда параллельно использовать данные низкочувствительных каналов; однако

искажения при попытке извлечении сигнала с периодом 20 с из записи обычного прибора сильных движений - акселерографа - могут быть недопустимо велики за счет высоких помех на этом канале.

2. Цифровая фильтрация записей. Используется односторонний (или «каузальный» или «физически реализуемый») полосовой фильтр, вносящий фазовый сдвиг и тем самым запаздывание моментов прихода максимальных амплитуд относительно реальности. Частоты среза фильтра 0.04 Гц и 0.0625 Гц, что соответствует периодам 25 и 16 с, соответственно. В нашей практике был использован фильтр Баттерворта четвертого порядка. Предварительно, до фильтрации, с записи велосиграфа следует убрать искусственный постоянный сдвиг амплитуды – эффект несовершенства АЦП.

3. Внесение амплитудной и фазовой коррекции за измерительный канал. При реконструкции «истинного» движения грунта следует использовать правильно спроектированный обратный фильтр с регуляризацией. В нашей практике применяли фильтр с установкой безразмерного параметра «уровень воды» на 20 Дб, то есть на 10% от максимального значения. Шаги 2 и 3 могут быть объединены и выполнены в частотной области, с сохранением каузальности и полосы фильтра.

4. Выбор временного окна обмера амплитуды. Методика успешно опробовалась для эпицентральных расстояний до 30-35°, при этом использовалось единое временное окно $[t_s, t_s+600с]$, t_s – время вступления S-волны. Это выбор рекомендуется. За счет фильтрации каузальным фильтром имеет место запаздывание видимого максимума, на 20-50 с относительно его истинной позиции, связанное с фазовыми сдвигами в полосовом фильтре; этот факт не оказывает реального искажающего влияния на результат обмера амплитуды.

5. Обмер максимальных амплитуд. Максимальные амплитуды снимаются с записи велосиграфа как $V_{max}=0.5(«2A»)$ (половина «двойной амплитуды» скорости). С каждой из трех компонент записи независимым образом снимаются три значения максимальной амплитуды. Для входа в формулу для магнитуды вычисляется условное значение «A/T»= $V_{max}/2\pi$. Это связано с желанием вносить минимальные изменения в структуру формулы для магнитуды, куда традиционно сходит отношение амплитуды смещения A и видимого периода T. (Вообще говоря, можно жестко следовать традиции, и проводить фактические оценки параметров амплитуды смещения A, видимого периода T и их отношения A/T; однако, как показал опыт, это усложнение не ведет к сколько-нибудь существенным изменениям оценок).

6. Контрольный обмер максимальных амплитуд микросейсм. При автоматическом режиме работы не мал риск получения фиктивных результатов за счет обмера амплитуд микросейсм, амплитуда которых в окне обмера сопоставима или больше, чем амплитуда поверхностных волн от землетрясения. Поэтому для автоматического режима абсолютно необходимо проводить контрольный обмер максимальных амплитуд микросейсм перед вступлением Р. Такой обмер проводится идентично процедуре предыдущего пункта, с тем лишь различием, что используется временное окно $[t_p-180 \text{ с}, t_p\text{с}]$, где t_p – время вступления Р-волны. Приемлемое отношение сигнал/шум - не менее 2.5 по амплитуде, в этом случае искусственное завышение оценки магнитуды не превысит 0.05.

7. Определение магнитуды $M_s(20R)$ по одной станции. Поясним, что в расчете $M_s(20R)$ фактически участвуют поверхностные волны Релея и Лява, но не делается попыток как-то учесть трехмерный векторный характер движения. Значение магнитуды $M_s(20R)$ для землетрясения по одной станции определяется с использованием калибровочной кривой, единой для вертикальной и горизонтальных компонент. Это делается следующим путем:

(7.1) Выявляются компоненты, приемлемые по шумам. Если отношение

$$RSN = \frac{\langle A/T \rangle (\text{землетрясение})}{\langle A/T \rangle (\text{микросейсмы})}$$

превышает 2.5, данная компонента может быть использована в расчете.

(7.2) Вычисляется среднеквадратичное значение $\langle A/T \rangle$ по всем приемлемым компонентам (обычно по трем компонентам). Для случая трех компонент это

$$\langle A/T \rangle_{\text{ск}} = \left(\frac{1}{3} \left([\langle A/T \rangle_Z]^2 + [\langle A/T \rangle_{NS}]^2 + [\langle A/T \rangle_{EW}]^2 \right) \right)^{0.5}$$

(7.3) По прилагаемому алгоритму, при известном эпицентральной расстоянии, вычисляется значение магнитуды. Таблично заданные калибровочные кривые имеются в двух вариантах, для двух групп станций региона ДВ России. При этом калибровочные кривые - единые для всех трех компонент.

(7.4) Была изучена необходимость внесения станционных поправок. На настоящем уровне изученности внесение поправок сочтено нецелесообразным. Их возможные значения могли бы быть ± 0.1 единиц М или менее. Особый случай - станция РЕТ («Петропавловск»), этот случай обсужден особо ниже.

8. Определение магнитуды по сети станций. Оценки $M_s(20R)$ индивидуальных станций усредняются по всем станциям используемой сети.

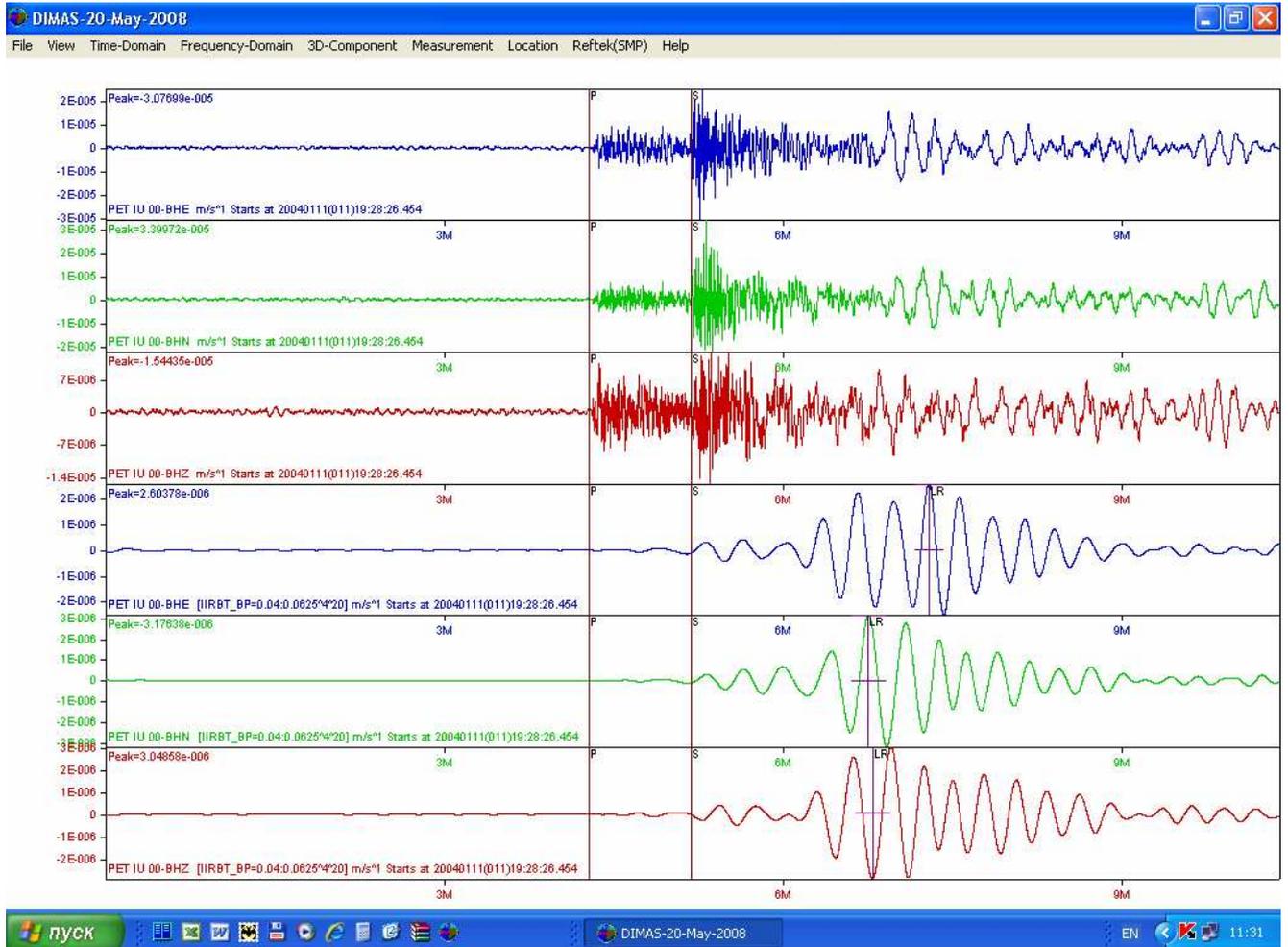


Рис 1. Пример записи землетрясения и проведенных измерений в диалоговом окне программы «DIMAS» Д.В.Дроздина. Верхние три трассы – сигналы велосиграфа BHZ, BHN, BHE. Нижние три трассы – результат полосовой фильтрации. Шкала времен по горизонтали в минутах. Символы P и S маркируют вступление P- и S-волн, знаком LR помечен момент измерения амплитуд профильтрованных поверхностных волн.

Список ограничений методики

- Эпицентральное расстояние должно составлять более 0.7° (80 км). Для эпицентральных расстояний $> 40^\circ$ (~4500 км) используется стандартная шкала $M_s(BB)$ (она же MLZ или Msz) или, возможно, $M_s(20)$. В диапазоне $20-40^\circ$ решение об использовании предлагаемой или стандартной калибровки следует принимать ответственному сейсмологу при проектировании использования методики.
- Значение параметра «магнитуда $M_s(20R)$ » имеет четкий смысл для землетрясений с глубиной очага до 60-70 км. Значение параметра $M_s(20R)$ может быть вычислено формально по описанному алгоритму для землетрясений с глубиной очага 70 км и более, но в этом случае полученное численное значение магнитуды обычно не отражает реальной мощности очага землетрясения и в этом плане является заниженным.
- В пределах окна обмера АЦП должен выдавать неискаженный, неклипированный сигнал. Наличие искажений типа клипирования / ограничения на фактической записи должно проверяться до любых операций с сигналом, так как эффект клипирования становится незаметен после полосовой и/или обратной фильтрации.
- Отношение сигнал землетрясения/ микросейсмический шум должно быть приемлемым (см. п. 7.1 выше)

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, численно определяемая по приведенному ниже алгоритму, Δ – эпицентральное расстояние в градусах, $0.7 \leq \Delta \leq 40$, A – среднеквадратическое по трем каналам значение максимальной «двойной амплитуды» смещения в поверхностной волне на выходе фильтра в мкм во временном окне $[t_s, t_s + 600\text{с}]$, t_s – время вступления S-волны, $T = 20$ с. При работе с цифровыми записями вместо (A/T) используется $V_{max}/2\pi$, где V_{max} – «двойная амплитуда» сигнала скорости.

Рекомендуются два варианта калибровочных кривых, каждый предназначен для одной из двух групп сейсмических станций.

(А) Станции, расположенные в зоне СЗ Тихого океана и его окраин, включая станции MDJ (Муданьжан) и MA2 (Магадан); их условное краткое название "островодужные". Список изученных станций такого рода включает PET, ADK, MA2, YSS, MDJ, INCN, ERM, MAJO.

(Б) Станции, расположенные вдали от окраинных морей Тихого океана; их условное краткое название "континентальные" Список изученных станций такого рода включает КАМ, ТИХИ, BILL, YAK.

Вид зависимостей $S_1(\Delta)$ и $S_2(\Delta)$ см рис. 2

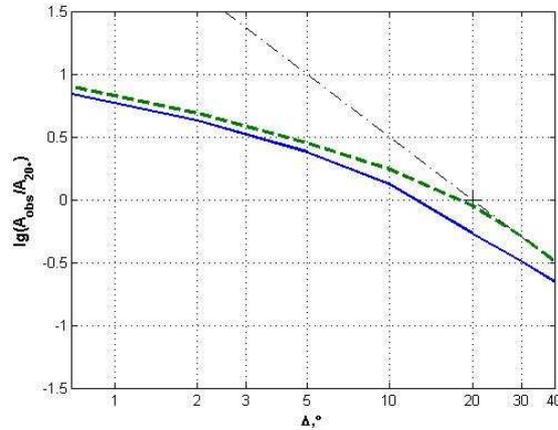


Рис 2. Калибровочные функции $S_1(\Delta)$ (сплошная, "островодужные" станции) и $S_2(\Delta)$ (штриховая, "континентальные" станции) и соответствующая калибровочная функция по Пражской формуле (штрих-пунктир)

Для отдельной сейсмической станции численные значения калибровочных функций $S(\Delta)$ для магнитуды $M_s(20R)$ определяются по данным табл.1 следующим образом:

Шаг 1. В зависимости от расположения станции выбрать строку с $S_1(\Delta)$ для "островодужных" или $S_2(\Delta)$ для "континентальных" станций.

Шаг 2. Вычислить $S(\Delta)$ по табл. 1, используя линейную интерполяцию по аргументу $\lg(\Delta)$. Различия новых вариантов $S(\Delta)$ относительно вариантов 2011 г менее 0.1 и редко превышает 0.05

Таблица 1. Значения калибровочных функций $S_1(\Delta)$ и $S_2(\Delta)$ для набора узловых значений Δ .

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 опред	0.90	0.69	0.45	0.24	-0.05	-0.29	-0.50	Не опред
$S_2(\Delta)$	Не опред	0.84	0.63	0.38	0.12	-0.27	-0.49	-0.66	Не опред

Особый случай - станция РЕТ («Петропавловск»),

Для станции РЕТ имеются весьма ограниченные данные об аномально низких амплитудах на определенных эпицентральных расстояниях ($\Delta \leq 6^\circ$) и для очагов в определенных азимутах (сектор ЮЗ). Обработанный материал не позволяет дать вполне надежной оценки величины аномалии, ее ориентировочное значение - (-0.2). Поэтому при использовании данных ст.РЕТ как одиночной станции можно рекомендовать вносить в ее станционные значения $M_s(20R)$ для эпицентров из названного района поправку: (+0.2).

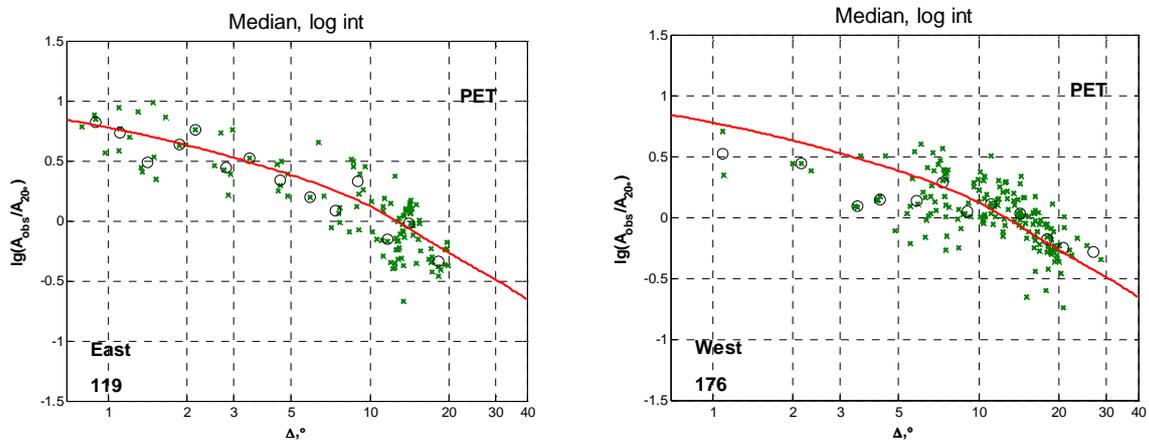


Рис. 3. Приведенные амплитуды (зеленые знаки «x») на ст. РЕТ для очагов в СВ (слева) и ЮЗ (справа) азимутальных секторах. Красная линия - калибровочная кривая $S_1(\Delta)$. Данных по секторам СЗ и ЮВ не имеется.

Дополнение: характеристика исходного материала

Для построения шкалы были использованы цифровые записи 433 землетрясений Северо-Западной части Тихоокеанского региона периода 1993-2009 гг. на 12 сейсмических станциях (PET, YSS, MA2, YAK, KAM, ADK, TIXI, BILL, MDJ, INCN, ERM, MAJO), всего 1659 трехкомпонентных записей. Глубина очагов землетрясений – до 70 км.

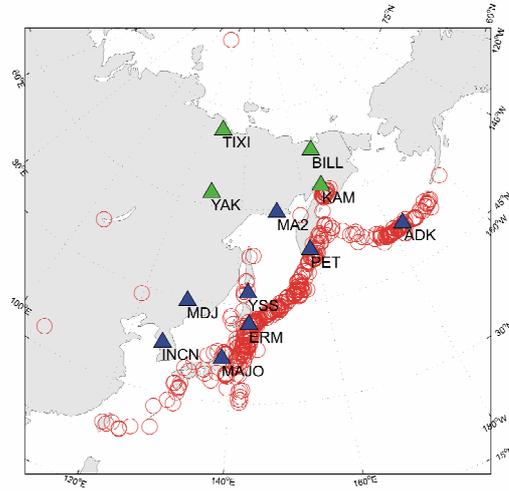


Рис 4. Карта-схема: изученные землетрясения (эпицентры, кружки) и станции (треугольники).

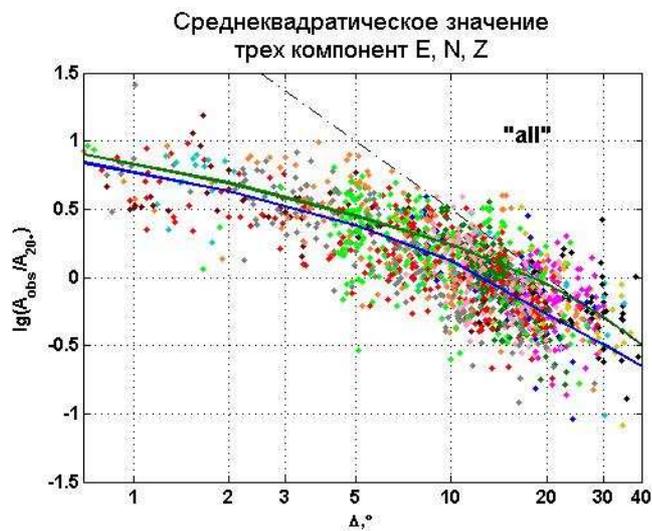


Рис. 5 Приведенные амплитуды поверхностных волн в сравнении с кривыми $S_1(\Delta)$ (сплошная) и $S_2(\Delta)$ (штриховая). С.к. отклонение около 0.25. Операция приведения заключалась в вычитании из наблюдаемого для станции значения расчетного ожидаемого значения $\lg(A/T)$ при $\Delta=20$ и магнитуде $M_s(20)$ согласно NEIC изучаемого землетрясения.