# УТОЧНЕННАЯ СВЯЗЬ *ML-М*<sup>w</sup> ДЛЯ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ УМЕРЕННЫХ МАГНИТУД (*M*=3-6)

<sup>1</sup>И.Р. Абубакиров, <sup>2,1,3</sup>А.А. Гусев, <sup>1</sup>Е.М. Гусева, <sup>1</sup>В.М. Павлов, <sup>1,3</sup>А.А. Скоркина <sup>1</sup>КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский <sup>2</sup>ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский <sup>3</sup>ИФЗ РАН, г. Москва

Аннотация. Для множества задач предпочтительна шкала моментных магнитуд Mw, которая принципиально отличается от остальных тем, что связана с сейсмическим моментом  $M_0$  очага ( $H \cdot m$ ). При этом опорной шкалой в регионе является ML, получаемая преобразованием энергетического класса  $K_{Sl,2}^{F68}$ . Накопленный архив цифровых волновых форм позволил применить методику массового определения  $M_0$  (и Mw) и уточнить связь ML-Mw для землетрясений Камчатки с M=3-6.

**Abstract.** Many tasks require moment magnitude Mw scale since it dramatically differs from the other scales by being tied to a source seismic moment  $M_0$  (units are Newton meter). However, the reference magnitude scale in the region is ML obtained by conversion of energy class  $K_{S1,2}^{F68}$ . Accumulated waveforms of the digital network allowed applying method of mass  $M_0$  (and Mw) estimation and then adjusting ML-Mw relationship for Kamchatka earthquakes of M=3-6.

### Введение

Для оценки величины землетрясения существует несколько разновидностей шкал. Опорной магнитудой для камчатских землетрясений считается региональная шкала ML, которая определяется пересчетом из  $K_{S1,2}^{F68}$  С.А. Федотова [1] по формуле:  $ML = K_{S1,2}^{F68} / 2 - 0.75$  [2]. Однако для многих задач предпочтительной является шкала моментных магнитуд Mw [3], принципиально отличающаяся от других ранее предложенных шкал магнитуд тем, что жестко связана с сейсмическим моментом очага,  $M_0$ :

 $Mw = (2/3) \cdot (\lg M_0 [H \cdot M] - 9.1).$ 

(1)

Моментные магнитуды для сильных камчатских землетрясений последних лет, получаемые по методике [4, 5], приведены в глобальном каталоге GCMT (порог определения Mw=4.7–4.8 и выше). Также ряд независимых оценок Mw для самых сильных землетрясений прошлого скомпилирован и критически обобщен в [6]. Отметим, что впервые эмпирически установленная для Камчатки связь Mw-ML [7], полученная в эпоху аналоговой регистрации, опиралась, в основном, на оценки Mw из глобального каталога (т.е. полученная связь характеризовала диапазон от  $Mw\approx4.5$  и выше).

Развернутая в 2006–2010 гг. на Камчатке сеть цифровых приборов [8] и накопленные волновые формы, уточнение региональной модели затухания [9] позволили применить методику массового определения сейсмического момента  $M_0$  и далее получить связь ML с Mw на новом качественном уровне для диапазона магнитуд ML=3-6.

#### Исходный набор данных

Для определения сейсмического момента  $M_0$  (и далее Mw) применили два подхода и, в силу требований методик, сформировали две коллекции записей землетрясений с перекрытием. В целом охвачен район с координатами 48.0–57.5°N, 153.5–165.5°E за период 2010–2014 гг. и с глубинами очагов не более 200 км (рис. 1). Коллекции отличаются количеством землетрясений и набором станций. Первая коллекция (рис. 1 а,  $K_{S1,2}^{F68}$ =9.0 и выше) состоит из записей станций: «Петропавловск» (РЕТ), «Апача» (АРС), «Усть-Камчатск» (КВG), «Никольское» (ВКІ), «Северо-Курильск» (SKR), «Ключи» (КLY) и «Эссо» (ЕSO). Вторая коллекция (рис. 1 б,  $K_{S1,2}^{F68}$ =7.0 и выше) включает записи приборов, расположенных на скальных или плотных грунтах: «Дальний» (DAL), «Ходутка» (КDT), «Карымшина» (КRM), «Петропавловск» (РЕТ), «Русская» (RUS), «Школа» (SCH), «Шипунский» (SPN) и «Институт» (IVS).

Для каждого землетрясения в каждой из коллекций имеется не менее трех записей с оптимальным соотношением сигнал/шум на «рабочих» частотах.



Рис. 1. Набор станций и эпицентры землетрясений коллекции № 1 (а) и № 2 (б). Расшифровка обозначений подходов к оценке Мw приводится далее в тексте

#### Методы определения сейсмического момента Мо

Для определения сейсмического момента  $M_0$  по сейсмическим данным существует два основных подхода: (1) решить обратную задачу, а именно, провести инверсию широкополосных волновых форм с использованием теоретических сейсмограмм; (2) использовать уровни низкочастотной части (НЧ) площадки очагового спектра смещения по данным объемных волн.

Подход (1) – через определение тензора сейсмического момента центроида (эквивалентного точечного источника) – для глобальной модели Земли осуществляется в рамках проекта GCMT. Эти данные обозначим –  $Mw^{\text{GCMT}}$ . Подход (1) также реализован в КФ ФИЦ ЕГС РАН [10] для региональных землетрясений, но с применением менее низкочастотной фильтрации. Результаты расчетов по этой методике обозначим  $Mw^{\text{RSMT}}$  (рис. 1 а), где RSMT – региональный тензор сейсмического момента эквивалентного точечного источника. В результате подхода (1) получаем тензор  $M_{ij}=M_0 \cdot m_{ij}$ , где  $M_0$  – искомый скалярный сейсмический момент, а единичный тензор  $m_{ij}$  задает механизм очага. Полученное значение  $M_0$  пересчитывается в Mw здесь и далее по формуле (1). Оценки  $Mw^{\text{RSMT}}$  сопоставимы с  $Mw^{\text{GCMT}}$  (53 пересечения,  $\mu$ =–0.09,  $\sigma$ =0.08). При этом фактический нижний порог определения Mw опускается с Mw=4.8 для  $Mw^{\text{GCMT}}$  до Mw=3.5 для  $Mw^{\text{RSMT}}$ .

Уточнение региональной модели затухания [9] и массовый счет очаговых спектров для камчатских землетрясений [11], в том числе очаговых спектров смещения, позволили применить подход (2). Были опробованы три модификации спектрального метода, которые отличаются способом счета спектра и/или временным окном для счета спектра. В первой из модификаций (2.1, предварительный этап) использован расчет спектра методом БПФ для группы S-волн (выбор временного окна осуществлялся интерактивно); такие оценки обозначим  $Mw^{SF}$ , где F – Fourier. Во второй модификации (2.2) при расчете

спектра использовали многополосную фильтрацию группы *S*-волн –  $Mw^{SB}$ , где В – Band. В третьей модификации (2.3) в качестве исходного материала использовали записи обратно-рассеянных *S*-волн (коду), которые подвергали многополосной фильтрации; такие оценки –  $Mw^{CB}$ , где С – кода, В – Band (рис. 2 б). Отметим, что модификации (2.2), (2.3) реализованы в автоматизированном режиме.



*Рис. 2.* Зависимость *ML(Mw)*, где оценка *Mw* выбрана следующим образом:

для  $ML>5 - Mw^{RSMT}$  (1), для  $ML\leq5 - Mw^{CB}$  (2). Наклон, соответствующий типу связи «1:1» (3). В предположении линейной связи с наклоном *b*=1: средняя связь (уравнение (а), 4), диапазон ± стандартное отклонение (5). Аппроксимация линейной ортогональной регрессией без фиксации наклона (уравнение (б), 6)

В модификациях (2.1) и (2.2) для приведения наблюденных спектров S-волн к очаговым вносилась поправка за потери вдоль луча, для чего воспользовались оценками  $Q_S(f)$  из [9], и за разницу в импедансах [11]. Геометрическое расхождение для объемных S-волн принимали сферическое (1/r). В модификации (2.3) использовалась двухшаговая процедура. Сначала спектр мощности коды, измеренный в подходящем окне, пересчитывался в спектр S-волн на фиксированном расстоянии, следуя методике Т.Г. Раутиан [12] на эмпирической основе; далее полученную оценку для спектра S-волн пересчитывали в очаг тем же путем, что и в (2.1) и (2.2). Важный элемент подхода (2) – это использование эмпирических спектральных станционных поправок, которые позволяли привести станционные спектры к условиям опорной скальной станции PET.

В подходе (2) оценку сейсмического момента *M*<sub>0</sub> определяли из уровня низкочастотной (НЧ) площадки спектра смещения и оценивали по формуле:

$$M_0 = \frac{\Omega_0 4\pi \rho r_0 V_s^3}{0.63 \times 2.0},$$
 (2)

где  $\Omega_0$  – уровень НЧ площадки спектра полного вектора смещения *S*-волны (*м c*), приведенного к условиям однородного упругого полупространства,  $\rho$  – плотность среды ( $\kappa z/m^3$ ),  $r_0$  – стандартное гипоцентральное расстояние (*м*),  $V_S$  – скорость *S*-волн (*м/c*), 0.63 – среднеквадратическая по фокальной сфере диаграмма направленности для *S*-волн и 2.0 – коэффициент, учитывающий эффект свободной поверхности. Принимали  $\rho$ =3300  $\kappa z/m^3$  и  $V_S$ =4700 *м/c*, как и в [13]. Наблюденные спектры приводили к расстоянию  $r_0$ =50  $\kappa m$  с помощью эмпирических функций затухания («калибровочных кривых»). Искривление лучей в расчетах не учитывалось.

Оценки Mw по нескольким станциям (не менее двух) осреднялись. Суммарные оценки удалось получить в 86, 57 и 61% случаев в модификациях (2.1,  $Mw^{SF}$ ), (2.2,  $Mw^{SB}$ ) и (2.3,  $Mw^{CB}$ ) соответственно для 890, 589 и 636 землетрясений. Для контроля оценок  $Mw^{CB}$ ,  $Mw^{SB}$  и  $Mw^{SF}$  использовали сопоставление с полученными ранее  $Mw^{RSMT}$ : для 139/76/97 пересечений  $Mw^{SF}/Mw^{SB}/Mw^{CB}$  с  $Mw^{RSMT}$ , средние (µ) равны –0.09/–0.02/0.01 со стандартными отклонениями ( $\sigma$ ) 0.28/0.22/0.23. При этом отметим, что для оценок  $Mw^{CB}$ , полученных в автоматизированной модификации 2.3 (внутрисетевое), стандартное уклонение ( $\sigma'$ ) для отклонений  $M-M_{HCT}$  (станционных оценок M относительно их точного значения) составляет 0.08, что говорит о высокой устойчивости полученных оценок

(например,  $\sigma'_{(SB)}=0.18$ ,  $\sigma'_{(SF)}=0.09$ ). Второй важный результат – снижение нижнего порога Mw, которого удалось достигнуть, реализовав подход (2) в его модификациях (новый порог определения моментных магнитуд для Камчатки – Mw=2.5).

## Уточнение связи *Мw–ML*

Большой практический интерес представляло сопоставление оценок Mw с локальной магнитудой ML (рис. 2). Теория и многие эмпирические исследования позволяют ожидать, во-первых, отклонения данной связи от линейности, а во-вторых, в случае линейности или слабой нелинейности, отклонения углового коэффициента полученной прямой связи от 1.0. В изучаемом случае оказалось, что в диапазоне Mw=3-6 вполне приемлемым является простейший вариант связи – линейный с наклоном единица. Полученные связи:

$$Mw=ML-0.40$$
,  
 $Mw=0.5(K_{S1,2}^{F68})-1.15$ .

Отметим, что экстраполяция предложенной линейной связи в область больших/меньших магнитуд нежелательна, поскольку при выходе за пределы исследуемого диапазона Mw=3-6 обнаружится нелинейность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. – М.: Наука, 1972. – 117 с.

2. *Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н.* Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 28–38.

3. *Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. – 1977. – V. 82, N 20. – P. 2981–2987.

4. *Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. – 1981. – V. 86. – P. 2825–2852.

5. *Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. – 2012. – V. 200. – P. 1–9.

6. *Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. – 2004. – № 3. – С. 34–42.

7. *Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.

8. **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шев**ченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40.

9. *Гусев А.А., Гусева Е.М.* Оценка затухания поперечных волн в среде вблизи ст. «Петропавловск», Камчатка, по спаду спектра // Физика Земли. – 2016. – № 4. – С. 35–51.

10. *Павлов В.М., Абубакиров И.Р.* Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 2 (20). – С. 149–158.

11. *Скоркина А.А., Гусев А.А.* Определение набора характерных частот очаговых спектров для субдукционных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // Геология и геофизика. – 2017. – № 7. – С. 1057–1068.

12. *Rautian T.G., Khalturin V.I.* The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1978. – V. 68, N 4. – P. 923–948.

13. *Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С.* Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 5. – С. 35–49.