

**Получение массовых оценок региональных моментных магнитуд  $M_w$  и установление их связи с  $M_L$  для субдукционных камчатских землетрясений**  
**А.А. Гусев<sup>1,2</sup>, А.А. Скоркина<sup>2</sup>, В.М. Павлов<sup>2</sup>, И.Р. Абубакиров<sup>2</sup>, Е.М. Гусева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; email: gusev@emsd.ru

<sup>2</sup>Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Общепринятой традицией становится стыковка региональных магнитуд  $M_L$  с моментной магнитудой  $M_w$ ; последняя жестко связана с сейсмическим моментом  $M_0$  очага, измеряемым в ньютон-метрах (Н·м). В работе: (1) описан ряд способов определения  $M_0$  для землетрясений Камчатки; (2) проведено сопоставление полученных оценок  $M_w$  друг с другом и с  $M_L$ .

### **Введение**

Для широкого спектра практических задач сейсмологии необходим каталог землетрясений с оценками магнитуд в единой шкале; при этом предпочтительной является шкала моментных магнитуд  $M_w$ , жестко связанная с сейсмическим моментом очага,  $M_0$ , измеряемым в физических единицах (Н·м). В настоящее время в качестве опорной магнитудной шкалы для Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [2] традиционно используется региональная магнитуда  $M_L$ , которая пересчитывается из энергетического класса  $K_S^{F68}$  [4] по формуле:  $M_L = K_S^{F68} / 2 - 0,75$ .

Оценки  $M_L$  для Курило-Камчатских землетрясений принято считать сопоставимыми с  $M_w$ . Однако полезно охарактеризовать связь  $M_L$  и  $M_w$  более детально. В этой связи возникают следующие группы задач: (1) сопоставить различные методики определения  $M_0$  и  $M_w$  в регионе и убедиться в согласованности получаемых оценок; (2) надежно определить среднюю связь  $M_w$  со стандартной региональной локальной магнитудой  $M_L$ . Эти задачи решали для условий Камчатки.

### **Исходный набор данных**

Предпосылкой такого исследования является создание в 2008–2010 гг. на Камчатке сети цифровых сейсмических станций (D0). Исходные данные по  $M_L$  имеются в региональном каталоге [2]. В качестве стандартных оценок  $M_w$  для Камчатки обычно рассматриваются оценки  $M_w^{GCMT}$  [5], с нижним порогом около  $M_w = 5$ . Для расширения набора данных по  $M_w$ , в дополнение к  $M_w^{GCMT}$  за период 2010–2014 для наборов Курило-Камчатских землетрясений ( $\varphi$ : 48°–58° с. ш.,  $\lambda$ : 153°–173° в. д.) оценили  $M_0$  по цифровым сейсмическим записям в регионе, велосиграфов и акселерографов (рис. 1).

### **Способы определения $M_0$ по цифровым сейсмическим записям**

Сейсмический момент  $M_0$  определяли четырьмя способами: (А) инверсией широкополосных сейсмограмм велосиграфов с использованием теоретических сейсмограмм; (В) по уровню спектров коды  $S$ -волны, по записям акселерографов; (С) по уровню спектров объемных  $S$ -волн, также по записям акселерографов. Последний определяли либо используя полосовую фильтрацию с помощью гребенки фильтров (С1), либо с использованием спектров Фурье (С2).

Для оценки  $M_w$  по уровню спектров выделяли по возможности площадку в низкочастотной части (НЧ) найденного очагового спектра смещений, что удавалось в 62% случаев (В), в 63% (С1) и в 69% (С2). В методах (В) и (С) для приведения наблюдаемых спектров к очаговым в форму спектра вносилась поправка за потери вдоль луча, для чего воспользовались оценками  $Q_S(f)$  из [1]. Для пересчета  $M_0$  в  $M_w$

использовали известную формулу:  $M_w = (2/3) \cdot (\log M_0 [\text{Н} \cdot \text{м}] - 9,1)$  [6]. Отметим, что методики (В) и (С1) реализованы в автоматизированном режиме, а методики (А) и (С2) – в интерактивном. Кратко охарактеризуем упомянутые способы определения  $M_0$ .

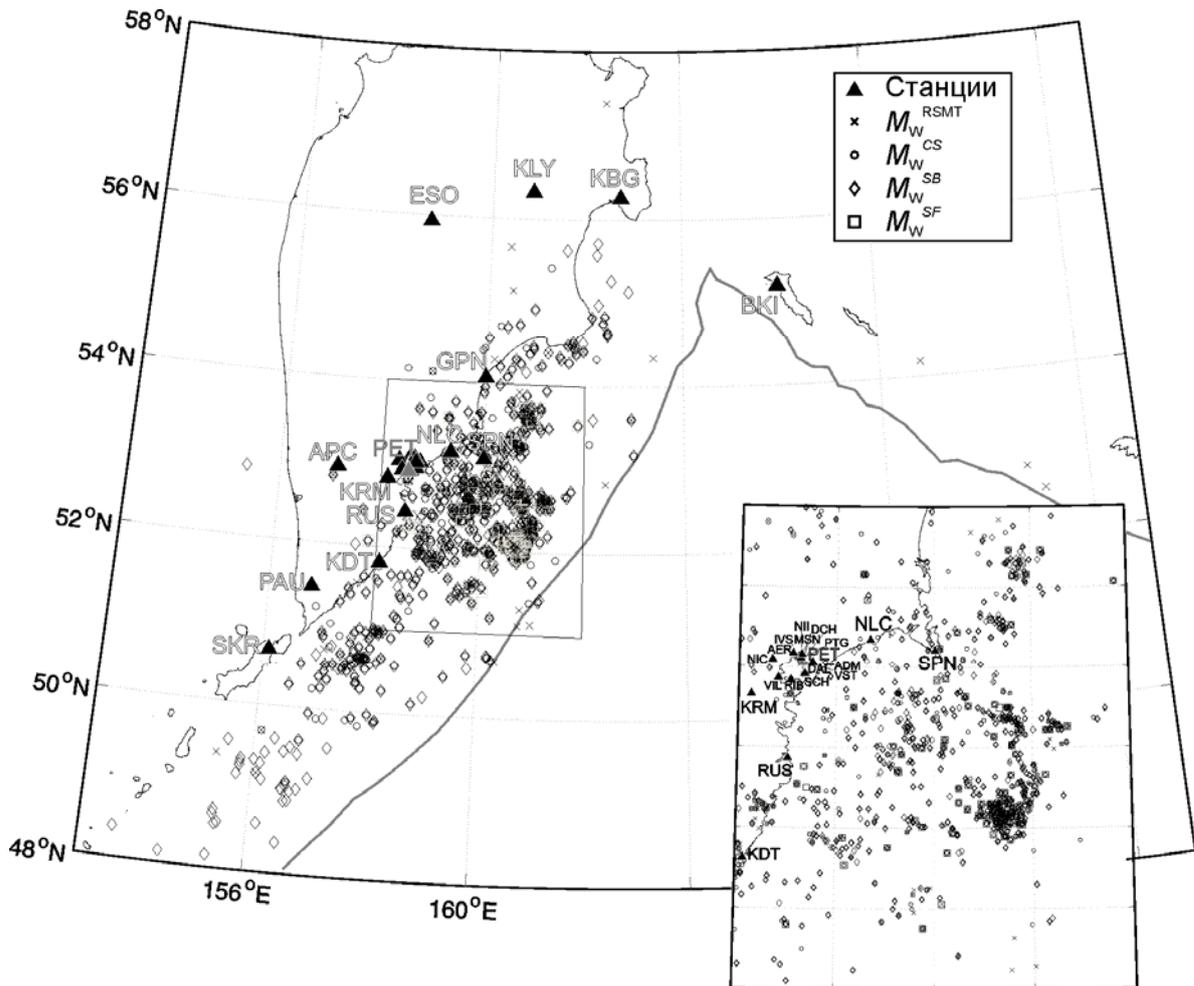


Рис. 1. Эпицентры землетрясений, для которых  $M_w$  определена региональными методами

(А) Проводили инверсию широкополосных сейсмограмм, результатом которой является тензор  $M_{ij} = M_0 \cdot m_{ij}$ , с последующим расчетом  $M_0$  и далее  $M_w$ . Используются теоретические сейсмограммы (функции Грина), рассчитанные по оригинальному варианту метода дискретных волновых чисел [3]. Обозначим такие оценки как  $M_w^{\text{RSMT}}$ .

Из 171 полученного решения RSMT в 118 случаях оценки  $M_w^{\text{GCMT}}$  отсутствуют. Количество пар RSMT–GCMT равно 53 (Табл. 1). Обнаружено хорошее согласие между региональными и глобальными оценками.

(В) Путем полосовой фильтрации широкополосной записи коды  $S$ -волны в наборе 12 полос шириной  $2/3$  октавы, перекрывающих диапазон 0,2–40 Гц, получали сглаженные оценки очаговых спектров; для чего сначала находили оценки среднеквадратического уровня коды, на запаздывании 100 сек относительно времени в очаге, а затем по уровню коды оценивали очаговый спектр, пользуясь доработанным вариантом методики Т. Г. Раутиан [7]. Далее выделяли, при возможности, НЧ площадку в найденном очаговом спектре. Уровень площадки дает значение  $M_0$ , которое пересчитывали в оценку  $M_w$ . Обозначим такие оценки  $M_w^{\text{CS}}$ , где “CS” соответствует коде  $S$ -волны (Coda of  $S$ -waves).

(С1) Подобно случаю (В), путем полосовой фильтрации записи  $S$ -волны рассчитывали очаговые спектры и оценивали уровни НЧ площадки. Обозначим такие

оценки  $M_w^{SB}$ , где “SB” соответствует способу определения  $M_0$  по уровню НЧ площадки очагового спектра смещений  $S$ -волн, причем спектр рассчитан полосовой фильтрацией (Band).

(С2) В интерактивном режиме определяли  $M_0$  спектральным методом по уровню площадки в НЧ спектра смещений  $S$ -волн. Группа  $S$ -волн на записи землетрясения выделялась в пределах сегмента шириной 10–30% от времени пробега  $S$ -волны, умножалась на косинусное окно в пределах 5% длительности сегмента, затем подвергалась БПФ. Спектр сглаживался с постоянным шагом по логарифму частоты, в пределах полосы шириной 2/3 октавы. Обозначим такие оценки  $M_w^{SF}$ , где “SF” соответствует способу определения  $M_0$  по уровню НЧ площадки очагового спектра смещений  $S$ -волн, причем спектр рассчитан БПФ (Fourier).

**Таблица 1. Сопоставление наборов данных и методов определения  $M_w$**

	Способ определения $M_w$				
	$M_w^{GCMT}$	$M_w^{RSMT}$	$M_w^{CS}$	$M_w^{SB}$	$M_w^{SF}$
Диапазон полученных $M_w$	4,8 – 6,8	3,4 – 6,6	2,5 – 6,3	2,6 – 6,2	3,7 – 5,5
$N$ станций	8 – 159	3 – 5	3 – 8	3 – 8	3 – 20
$N$ полученных $M_w$	142	171	680 из 1099	692 из 1099	117 из 170
$N$ пересечений с $M_w^{GCMT} / M_w^{RSMT}$	—	53 / —	65 / 123	82 / 115	23 / 27
$\mu(M_w^* - M_w^{GCMT}) /$ $\mu(M_w^* - M_w^{RSMT})$ <sup>1</sup>	—	-0,09 / —	-0,06 / 0,03	-0,11 / 0,05	-0,21 / -0,04
$\sigma(M_w^* - M_w^{GCMT}) /$ $\sigma(M_w^* - M_w^{RSMT})$ <sup>2</sup>	—	0,08 / —	0,21 / 0,26	0,22 / 0,25	0,17 / 0,14
Нижний порог полноты каталога с полученными оценками $M_w$	~ 5,0	~ 4,0	~ 3,5	~ 3,5	~ 4,0

<sup>1</sup>Средняя разность оценок двух методов. Обобщенный индекс (\*) следует понимать в соответствующем столбце как  $CS / SB / SF$ .

<sup>2</sup>Стандартное уклонение разностей индивидуальных оценок двух методов.

## Результаты

*Сопоставление региональных оценок  $M_w$  между собой.* Суммарные численные характеристики перечисленных методов и данных приведены в Таблице 1, а сопоставление индивидуальных оценок представлено на рис. 2. Видно, что низкочастотные оценки RSMT и GCMT согласуются очень хорошо, что, скорее всего, говорит об их вполне приемлемой точности. Для контроля оценок  $M_w^{CS}$ ,  $M_w^{SB}$  и  $M_w^{SF}$  использовали сопоставление с полученными ранее  $M_w^{GCMT}$  и  $M_w^{RSMT}$ . Для оценок по спектрам  $S$ -волн и коды согласие с низкочастотными оценками несколько хуже, чем между такими оценками, но все же его можно считать удовлетворительным. Важный результат – снижение нижнего порога  $M_w$ , которого удастся достигнуть каждым из региональных методов.

*Связь между региональной магнитудой  $M_L$  и  $M_w$ .* Далее изучали связь  $M_L$ – $M_w$ . Хотя можно было ожидать и отклонения данной связи от линейности, и, в случае линейности, отклонения углового коэффициента полученной прямой от 1,0, оказалось, что предположение линейной связи  $M_L$  и  $M_w$ , и постоянной разности этих величин, является приемлемым в изученном диапазоне  $M_w = 3,0$ – $6,0$  ( $M_L = 3,4$ – $6,4$ ). Результаты представлены в Таблице 2. Рекомендованные связи:  $M_w = M_L - 0,40$  и  $M_w = 0,5(K_S^{F68}) - 1,15$ .

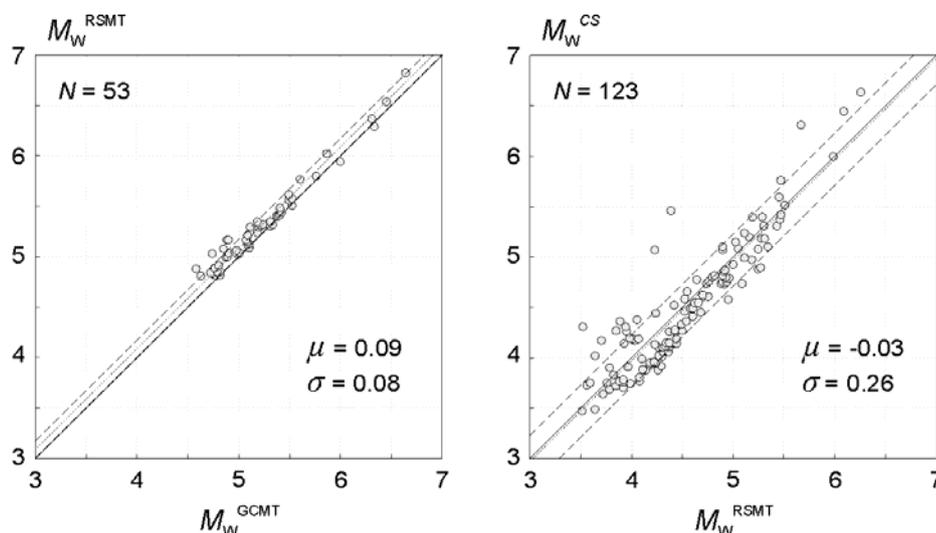


Рис. 2. Связи между магнитудами. Слева – связь  $M_w^{RSMT}$  (ордината) и  $M_w^{GCMT}$  (абсцисса). Справа – связь  $M_w^{CS}$  (ордината) и  $M_w^{RSMT}$  (абсцисса). Среднюю связь дает точечный пунктир (1), стандартные отклонения ( $\sigma$ ) – штриховой пунктир (2). Сплошные линии (3) соответствуют типу связи 1:1. В предположении линейной связи оценок  $M_w$ , полученных разными способами, оценивали постоянную разность для пар оценок, принимая угловой коэффициент равным 1,0

Таблица 2. Связь оценок  $M_w$ , полученных разными способами, с  $M_L(K_S^{F68})$

Способ определения $M_w$	$N$ пар	$\mu(M_w - M_L)$	$\sigma(M_w - M_L)$
$M_w^{GCMT}$	142	-0,34	0,23
$M_w^{RCMT}$	171	-0,40	0,26
$M_w^{CS}$	680	-0,39	0,23
$M_w^{SB}$	692	-0,42	0,24
$M_w^{SF}$	117	-0,48	0,16
Рекомендуемая поправка:		-0,40	

### Список литературы

1. 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.
2. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Единая информационная система сейсмологических данных. URL: <http://www.emsd.ru/sdis> (дата обращения: 27.10.2016).
3. 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.
4. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд // Наука, 1972. 117 с.
5. Global Centroid Moment Tensor Project. URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения: 27.10.2016).
6. Kanamori, H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. 1977. V. 82. №20. P. 2981–2987.
7. Rautian, T.G., Khalturin, V.I. The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum // Bulletin of the Seismological Society of America. 1978. V. 68. №4. P. 923–948.