

У. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

УДК 550.348.436

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РЕГИОНАЛЬНЫМИ И СРЕДНЕМИРОВЫМИ ОЦЕНКАМИ ВЕЛИЧИНЫ НЕГЛУБОКИХ КУРИЛО-ОХОТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Л.Н. Поплавская, Ю.Ю. Пермикин

*Институт морской геологии и геофизики, г. Южно-Сахалинск
seismol@imgg.ru*

В практике сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России для оценки величины землетрясения применяются разные магнитудно-энергетические шкалы, показанные на схеме рис. 1 двумя блоками: для землетрясений с $h \leq 80$ км и $h > 80$ км. Однако в настоящей статье исследуются только неглубокие ($h \leq 80$ км) землетрясения. Рассмотрим вкратце виды магнитуд и способы их определения.

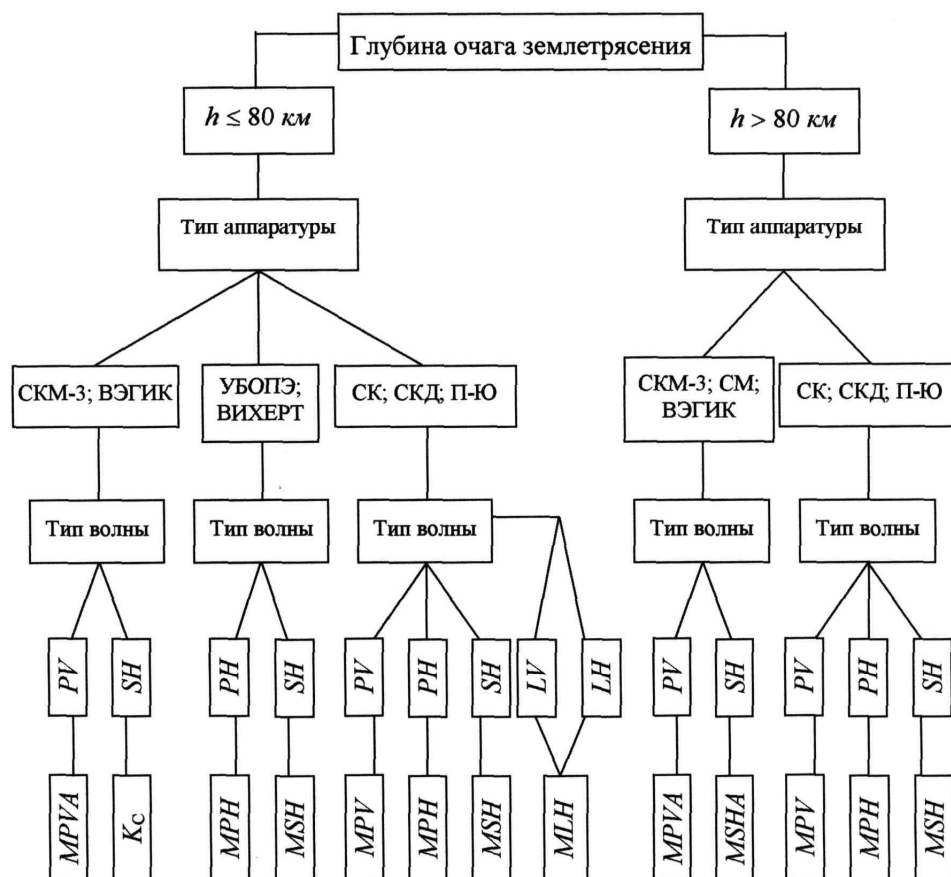


Рис. 1. Схема используемых типов аппаратуры и сейсмических волн для определения магнитуд и энергетических классов землетрясений Курило-Охотского региона с $h \leq 80$ и $h > 80$ км

Магнитуды MLH , MLV [1–4] определяются по отношению A/T в максимальной фазе поверхностной волны на записях горизонтальной (H) или вертикальной (V) компонент стандартной низкочастотной аппаратуры СК или СКД в диапазоне периодов от 5 до 7 с при небольших расстояниях $\Delta \leq 10^\circ$ и от 12 до 17 с при $\Delta > 10^\circ$.

Магнитуды MPV , MPH [1, 2, 4–7] определяются величиной A/T в максимуме P -волн на записях аппаратурой СК, СКД в интервале периодов 3–10 с на вертикальной или горизонтальной компонентах соответственно; магнитуды $MPVA$ [8] – то же, что MPV , но по записям короткопериодной аппаратурой СКМ.

Магнитуды MSH [1, 4, 6] определяются по аналогии с магнитудами MPV , но по записям в максимуме поперечных S -волн.

Энергетический класс K_C [4, 9, 10] определяется по отношению A/T в максимальной фазе S -волн, записанных короткопериодной аппаратурой (СКМ, ВЭГИК).

Кроме того, в рамках сейсмической части службы предупреждения об угрозе цунами были разработаны шкалы MPH , MSH для специализированной аппаратуры УБОПЭ (установка быстрого определения положения эпицентра). Аппаратура низкочувствительная, с увеличением $V=0$ и $V=2$, и предназначена для регистрации землетрясений с магнитудами >7 [4, 11–13].

Для землетрясений с $h > 80$ км списочный состав магнитудных шкал тот же (добавилась лишь шкала $MSHA$), но калибровочные функции для них учитывают влияние глубины залегания гипоцентра [14–19].

Уже к моменту создания дальневосточных шкал магнитуд, энергетического класса K_C и внедрения их в эксплуатацию в 1967 г. С.Л. Соловьёвым и О.Н. Соловьёвой были предложены следующие уравнения связи по записям неглубоких ($h \div 10–70$ км) землетрясений сейсмографами СК–ГК и ВЭГИК–ГБ за период наблюдений с 1954 по 1963 гг. [5, 9]:

$$K_C = 1.2 + 2 MLH, \quad (1)$$

$$MPV = 2.62 + 0.63 MLH, \quad (2)$$

$$MSH = 1.71 + 0.75 MLH, \quad (3)$$

где $K_C \div 9–13$, $MLH \div 4–6$ для (1) и $MLH \div 5–6$ для (2) и (3).

Через 15 лет А.В. Викулиным были вновь обстоятельно исследованы соотношения типа (1) между MLH и K_C для Курило-Камчатского региона по записям землетрясений аппаратурой СКМ, ВЭГИК за другой период времени – с 1965 по 1978 г. В результате в [20] было получено уравнение вида:

$$K_C = 1.46 \pm 0.57 + 1.72 MLH, \quad (4)$$

которое практически совпадает с полученным соотношением (1). Важно отметить, что А.В. Викулин впервые ввел ошибку σ определения MLH по переходному соотношению: $\sigma MLH(K_C) = \pm 0.57$.

Качество уравнений связи (2), (3) исследовалось Л.Н. Поплавской в связи с поиском источника ошибок в оценке MLH для нужд службы цунами. Было установлено, что рассеяние σMLH средних значений MLH , полученных с использованием (2), (3), колеблется от 0.3 до 0.5 для аппаратуры общего типа и от 0.5 до 1.0 – для аппаратуры с механической регистрацией [21, 22].

Поиск пути снижения этих ошибок привел к необходимости исследовать ошибки σ определения величины землетрясения по каждой из используемых шкал индивидуально. В итоге были получены следующие средние значения σ : $\sigma MLH = 0.25$; $\sigma MPV = 0.30$; $\sigma MSH = 0.28$; $\sigma K_C = 0.50$ [21, 22].

К 1980 г. закончилось аппаратурное переоснащение сейсмических станций Дальнего Востока с СК и ВЭГИК на СКД и СКМ, что с очевидностью потребовало пересмотра уравнений связи (1) – (4). С этой целью были использованы записи землетрясений в диапазоне магнитуд 3.5–7.5 с нормальной ($h \leq 80$ км) глубиной очага за 1980–2000 гг. [23]. Карта их эпицентров приведена на рис. 2. Работа выполнялась Ю.Ю. Пермикиным [24]. Как видно на картах-врезках рис. 2, землетрясения распределены неравномерно по глубине очага h . Максимум распределения приходится на интервал $h = 30–60$ км.

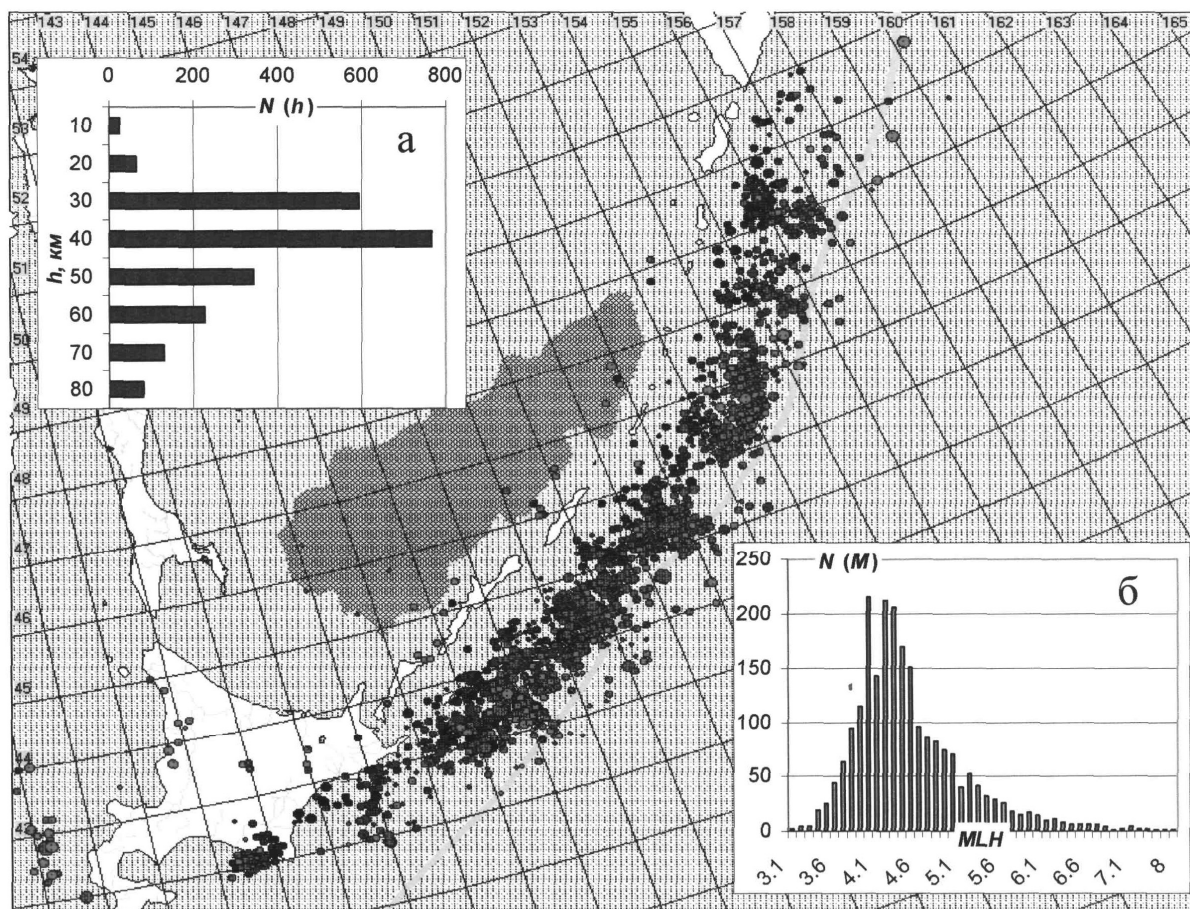


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Курило-Охотского региона с $h \leq 80$ км за 1980–2000 гг.

На гистограммах-врезках: а – распределение $N(h)$; б – распределение $N(M)$. Затемнено местоположение Южно-Охотской глубоководной котловины.

Поиску корреляционных соотношений предшествовала процедура группирования исходного материала с шагом, равным средним погрешностям их определения, приведенным выше, и все использованные для анализа данные были табулированы (табл. 1). Исходные данные группированы. Шаг группирования аргумента равен 0.25 для M и 0.5 – для K_C .

Таблица 1. Средние значения MLH и их стандартные погрешности при пересчете из других магнитуд за 1980–2000 гг.

M	$MLH=f(MPV)$			$MLH=f(MSH)$			σ_{MLH}	K_C	$MLH=f(K_C)$		
	MLH	N	σ_{MLH}	MLH	N	σ_{MLH}			MLH	N	σ_{MLH}
4.5				4.14	18	0.32	0.24				
4.75				4.17	35	0.32	0.28	9	3.78	74	0.26
5				4.40	97	0.36	0.27	9.5	3.88	176	0.21
5.25	4.52	12	0.34	4.41	139	0.38	0.30	10	4.12	582	0.31
5.5	4.62	96	0.34	4.68	328	0.44	0.29	10.5	4.32	484	0.31
5.75	4.80	104	0.39	4.83	147	0.47	0.23	11	4.56	320	0.42
6	4.97	194	0.41	5.26	150	0.51	0.26	11.5	4.84	189	0.52
6.25	5.25	118	0.49	5.60	48	0.56	0.32	12	5.09	102	0.56
6.5	5.57	94	0.62	6.04	44	0.60	0.26	12.5	5.56	28	0.48
6.75	6.08	31	0.57	6.57	12	0.17	0.17	13	5.88	13	0.51
7	6.56	20	0.44	7.07	6	0.23	0.30				

В результате было установлено, что соотношения $MLH=f(MPV)$, $MLH=f(MSH)$, $MLH=f(K_C)$ для Курило-Охотского региона нелинейны (рис. 3) и имеют вид:

$$MLH = 0.585 MPV^2 - 6.01 MPV + 20.0, \quad (5)$$

$$MLH = 0.451 MSH^2 - 4.02 MSH + 13.1, \quad (6)$$

$$MLH = 0.070 K_C^2 - 1.00 K_C + 7.2. \quad (7)$$

Среднеквадратичная погрешность среднеинтервальных значений MLH по этим корреляционным соотношениям оказалась равной следующим значениям:

$$\sigma_{MLH} (MPV) = 0.45,$$

$$\sigma_{MLH} (MSH) = 0.45,$$

$$\sigma_{MLH} (K_C) = 0.37.$$

Как видим, во всех случаях имеет место превышение σ_{MLH} исходной шкалы. Каждая из σ определена по формуле:

$$\sigma M = \left(\frac{1}{N-1} \sum_1^T n_i \sigma^2 M_i \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где $N = \sum n_i$; n_i – число независимых определений σM_i в данном интервале магнитуд; T – общее число интервалов.

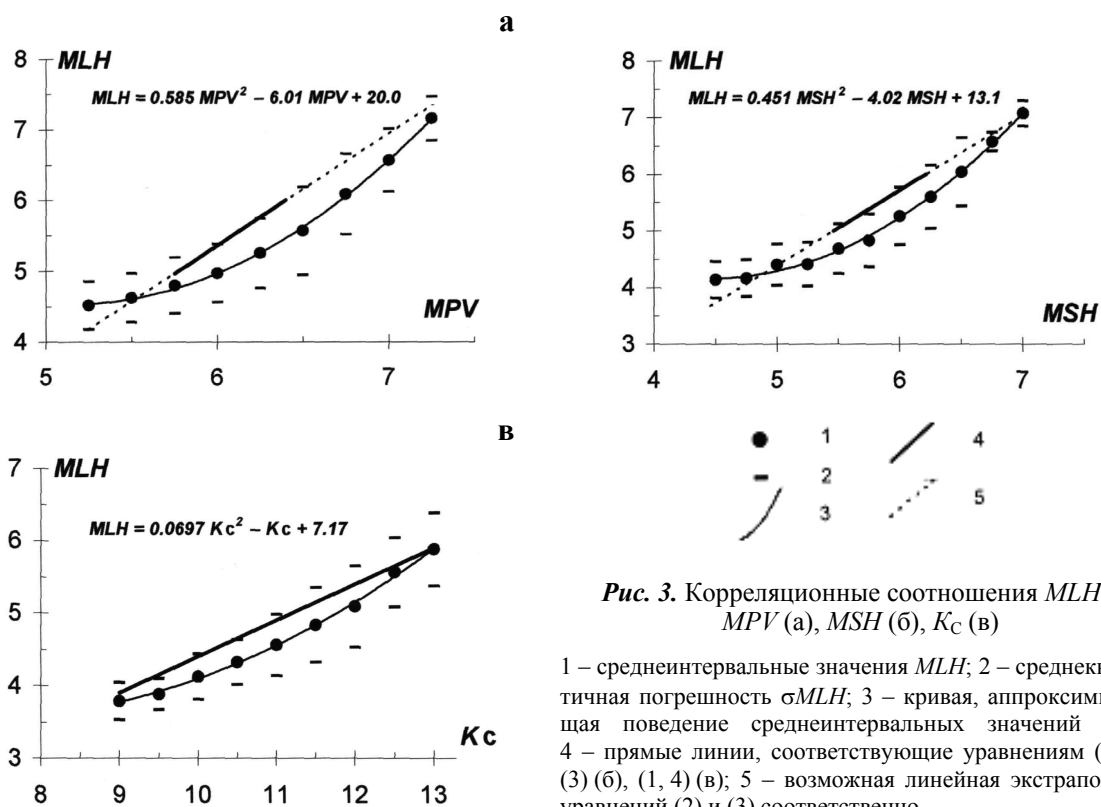


Рис. 3. Корреляционные соотношения MLH с MPV (а), MSH (б), K_C (в)

1 – среднеинтервальные значения MLH ; 2 – среднеквадратичная погрешность σ_{MLH} ; 3 – кривая, аппроксимирующая поведение среднеинтервальных значений MLH ; 4 – прямые линии, соответствующие уравнениям (2) (а), (3) (б), (1, 4) (в); 5 – возможная линейная экстраполяция уравнений (2) и (3) соответственно.

Таким образом, в результате проведенных исследований получен набор переходных соотношений, связывающих наиболее употребительные в регионе магнитуды MLH , MPV , MSH и энергетический класс K_C , а также найдены значения ошибок осуществляемых переходов.

Немаловажной проблемой является задача интеграции региональных каталогов землетрясений Курило-Охотского региона в международные каталоги, в частности, в каталоги NEIC. Она решалась по данным наблюдений за тот же период 1980–2000 гг. С этой целью региональные каталоги землетрясений за указанные годы были дополнены магнитудами m_b , M_s , M_w из соответствующих каталогов NEIC [25]. Работа выполнялась также Ю.Ю. Пермикиным [26]. Расчеты проведены по описанной выше методике, их результаты представлены на рис. 4.

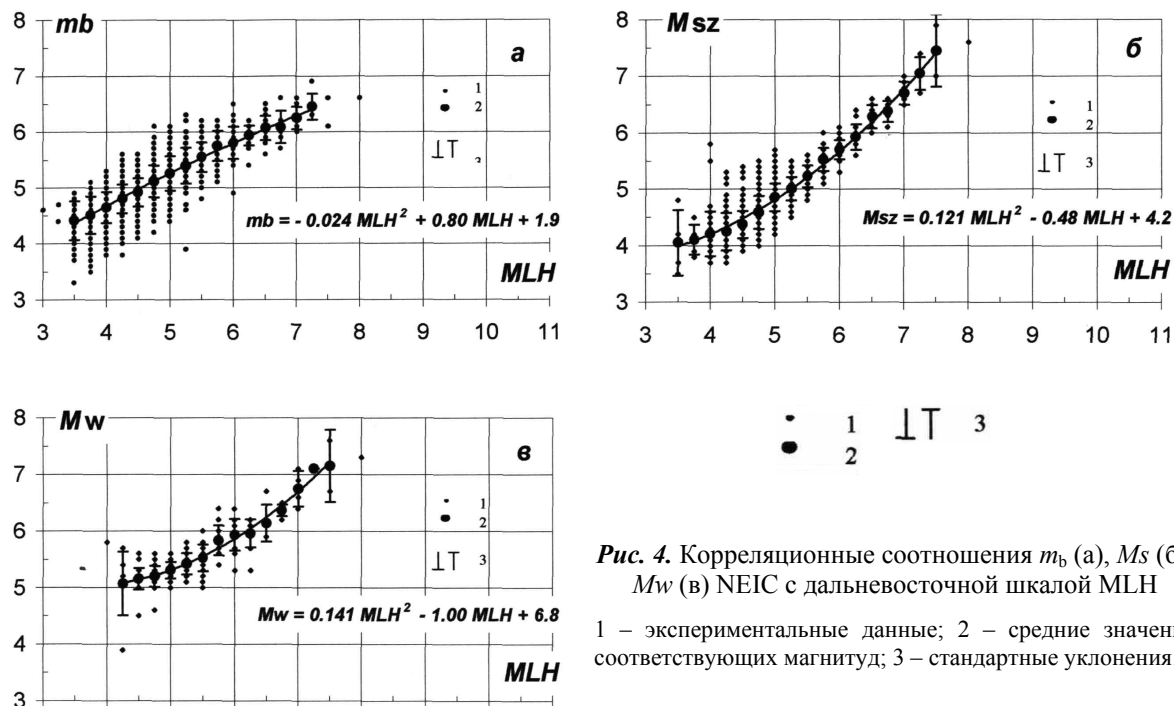


Рис. 4. Корреляционные соотношения m_b (а), M_s (б), M_w (в) NEIC с дальневосточной шкалой MLH

1 – экспериментальные данные; 2 – средние значения соответствующих магнитуд; 3 – стандартные отклонения.

В результате выявлено, что связь региональной магнитуды MLH с m_b , M_s , M_w NEIC нелинейна. Уравнения связи на рис. 4 а–в имеют вид:

$$m_b = -0.024 MLH^2 + 0.80 MLH + 1.9 \quad \sigma_{m_b}(MLH) = 0.28, \quad (9)$$

$$M_s = 0.121 MLH^2 - 0.48 MLH + 4.2 \quad \sigma_{M_s}(MLH) = 0.26, \quad (10)$$

$$M_w = 0.141 MLH^2 - 1.00 MLH + 6.8 \quad \sigma_{M_w}(MLH) = 0.23 \quad (11)$$

соответственно, при коэффициенте корреляции 0.99. Как и в случае внутрирегиональных соотношений, исходные данные сгруппированы по аргументу. Шаг группирования равен 0.25 M . Все данные, использованные для анализа табулированы (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения магнитуд m_b , M_s , M_w (NEIC) и их стандартные отклонения при пересчете из магнитуд MLH землетрясений Курило-Охотского региона за 1980–2000 гг.

MLH	$m_b=f(MLH)$			$M_s=f(MLH)$			$M_w=f(MLH)$		
	m_b	N	σ_{m_b}	M_s	N	σ_{M_s}	M_w	N	σ_{M_w}
3.5	4.41	54	0.35	4.05	4	0.58	–	–	–
3.75	4.52	115	0.33	4.11	9	0.26	–	–	–
4	4.65	457	0.28	4.21	41	0.4	–	–	–
4.25	4.81	506	0.26	4.25	102	0.33	5.07	7	0.56
4.5	4.92	534	0.25	4.37	192	0.24	5.15	25	0.19
4.75	5.12	199	0.29	4.59	107	0.29	5.2	26	0.19
5	5.26	224	0.31	4.86	132	0.25	5.31	37	0.15
5.25	5.4	100	0.32	5.01	65	0.21	5.42	30	0.19
5.5	5.55	106	0.26	5.23	77	0.19	5.53	35	0.24
5.75	5.75	35	0.27	5.52	29	0.21	5.83	15	0.26
6	5.81	50	0.28	5.7	40	0.17	5.94	14	0.28
6.25	5.93	23	0.18	5.92	17	0.23	5.96	12	0.25
6.5	6.07	23	0.21	6.28	16	0.21	6.14	5	0.33
6.75	6.08	12	0.29	6.38	9	0.19	6.37	6	0.1
7	6.24	9	0.2	6.7	7	0.2	6.75	4	0.31
7.25	6.45	6	0.23	7.05	4	0.29	7.1	2	0
7.5	6.35	2	0.35	7.45	2	0.64	7.15	2	0.64

Из табл. 2 следует, что наиболее устойчивым по всему диапазону изученных значений M является соотношение (9), связывающее MLH с m_b . Оценки M_s и M_w по (10) и (11) соответственно подвержены значительному рассеянию в области малых ($M \leq 3.5$) и больших ($M > 7.25$) магнитуд, заметно превышающему среднюю оценку $\sigma M_s, \sigma M_w$. Это обстоятельство, по-видимому, является следствием недостаточной статистической обеспеченности задачи в области малых и больших магнитуд.

Ранее А.А. Гусевым и В.Н. Мельниковой выполнено исследование межмагнитудных связей региональных и среднемировых шкал на примере Камчатки. Результаты этих исследований относительно магнитуды MLH и среднемировых магнитуд m_b, M_s, M_w , приведенные в [27], изображены на рис. 5. К сожалению, расчета уравнений связи в [27] нет.

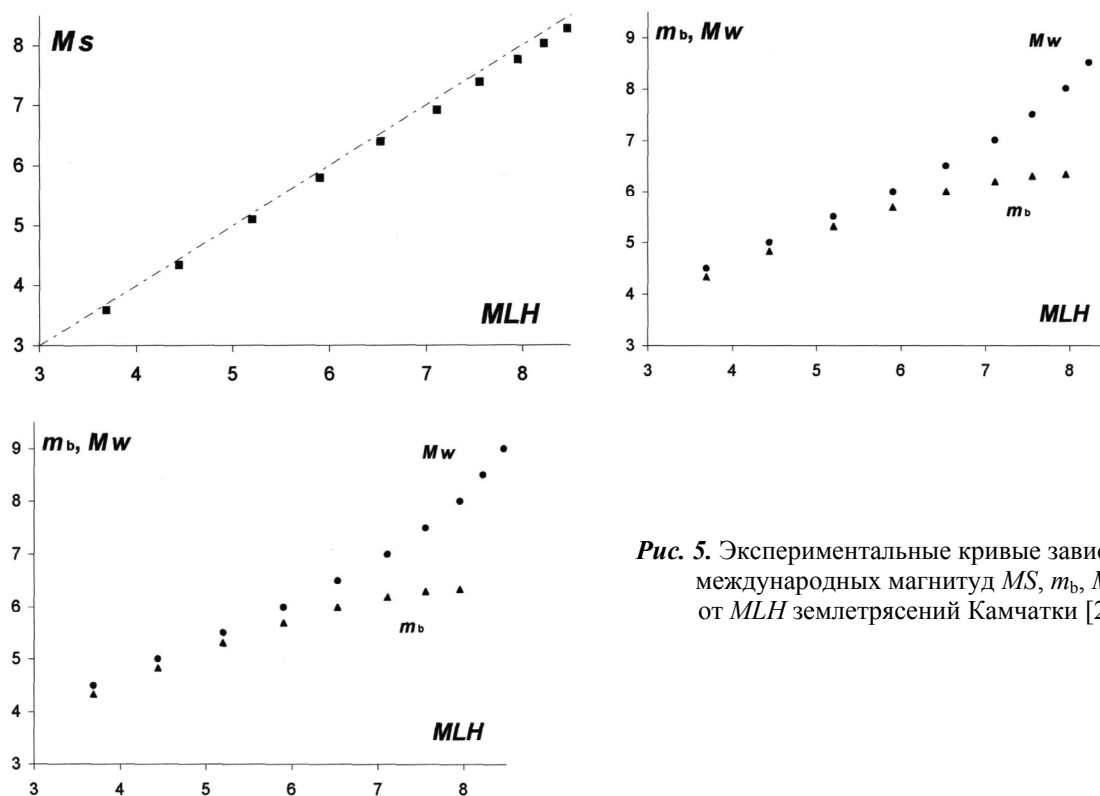


Рис. 5. Экспериментальные кривые зависимости международных магнитуд M_s, m_b, M_w от MLH землетрясений Камчатки [27]

Сравнение вида кривых на рис. 4, 5 позволило утверждать, что основные тенденции межмагнитудных связей для Камчатки и Курило-Охотского региона подобны. Однако, поскольку они не совпадают в деталях, следует сделать предположение о региональном характере коэффициентов в уравнениях типа (9)–(11).

Таким образом в результате проведенных исследований получены переходные соотношения (5)–(7) от дальневосточных магнитудно-энергетических шкал MPV, MSH, K_C к наиболее употребительной на территории Дальнего Востока России шкале MLH в нелинейном виде. Эффективной оказалось использование нелинейной формы переходных соотношений (9)–(11) для корреляции MLH со среднемировыми шкалами m_b, M_s, M_w .

Авторы благодарны руководству ГС РАН в лице О.Е. Старовойта за введение в проблему и старшему научному сотруднику лаборатории цунами ИО РАН О.Н. Соловьёвой – за доброжелательное внимание к работе и полезные советы.

Л и т е р а т у р а

1. Соловьёва О.Н., Соловьёв С.Л. Новые данные о динамике сейсмических волн неглубокофокусных Курило-Камчатских землетрясений // Проблема цунами. – М.: Наука, 1968. – С. 75–97.
2. Соловьёв С.Л. Об изменении с расстоянием амплитуды колебаний почвы в поверхностных волнах Курило-Камчатских землетрясений // Изв. АН СССР. – Сер. геофизическая. – 1958. – № 11. – С. 1323–1334.

3. Соловьёв С.Л. О региональных отличиях калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясения по поверхностным волнам // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – Т. II. – С. 55–59.
4. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР. – М.: Наука, 1982. – 272 с.
5. Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Скорость колебаний земной поверхности в объемных волнах неглубокофокусных Курило-Камчатских землетрясений на расстояниях до 17° // Физика Земли. – 1967. – № 1. – С. 37–59.
6. Соловьёва О.Н., Соловьёв С.Л. Амплитудные кривые волн P_V , P_H и S_H неглубокофокусных Тихоокеанских землетрясений на расстояниях $2-40^\circ$ // Тр. сессии КАПГ в Шопроне. – Будапешт, 1972. – С. 119–137.
7. Соловьёва О.Н. Станционные поправки Δm_{PV} для дальневосточных станций // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – Т. II. – С. 60–64.
8. Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н. Региональная шкала $MPV(A)$ для оценки магнитуд Дальневосточных землетрясений с нормальной глубиной очага // Сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука, 1989. – С. 39–40.
9. Соловьёв С.Л., Соловьёва О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // Физика Земли. – 1967. – № 2. – С. 13–23.
10. Анахин В.Д., Соловьёв С.Л. Скорость колебания земной поверхности в короткопериодных продольных волнах неглубокофокусных землетрясений // Физика Земли. – 1969. – № 1. – С. 13–20.
11. Иващенко А.И., Жук Ф.Д. Калибровочные кривые для определения m_r и m_s по записям механических сейсмографов // Теория и оперативный прогноз цунами. – М.: Наука, 1980. – С. 74–106.
12. Оскорбин Л.С., Соловьёва О.Н. Номограмма для оперативного определения магнитуды близких землетрясений по объемным волнам, записанным сейсмографами с механической регистрацией // Теория и оперативный прогноз цунами. – М.: Наука, 1980. – С. 107–111.
13. Соловьёва О.Н. Определение магнитуды Курило-Камчатских землетрясений по записям механических сейсмографов // Волны цунами (Тр. СахКНИИ, № 29). – Южно-Сахалинск: ДВНЦ АН СССР, 1972. – С. 250–261.
14. Соловьёва О.Н., Волкова Л.Ф., Поплавская Л.Н. Калибровочная функция для определения магнитуд $MPV(A)$ близких глубокофокусных землетрясений Дальнего Востока // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. – Южно-Сахалинск: ДВНЦ АН СССР, 1985. – С. 29–30.
15. Соловьёва О.Н. Классификация глубокофокусных землетрясений Дальнего Востока по магнитуде // Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука, 1978. – С. 10–23.
16. Соловьёва О.Н. Классификация глубокофокусных землетрясений Дальнего Востока по магнитуде: Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. – М.: Фонды ИФЗ РАН, 1974. – 235 с.
17. Соловьёва О.Н., Волков И.Е. Определение магнитуды глубокофокусных землетрясений Охотского моря и Курильских островов // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – Т. II. – С. 94–103.
18. Соловьёва О.Н., Волкова Л.Ф. Калибровочная функция для определения магнитуды $MPV(A)$ близких глубокофокусных землетрясений // Количественная сейсмология и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке. Тез. докл. V научн. сессии Дальневост. секции МСССС. Магадан, 18–23 марта 1985 г. – Южно-Сахалинск: ДВНЦ АН СССР, 1985. – С. 29–30.
19. Соловьёва О.Н. Определение магнитуды глубокофокусных землетрясений // Физика Земли. – 1978. – № 1. – С. 25–35.
20. Викулин А.В. О соотношении между энергетическими и магнитудными классификациями землетрясений Камчатки, Курил и Японии // Вулканология и сейсмология. – 1983. – № 3. – С. 90–98.
21. Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. – М.: Наука, 1988. – 87 с.