

УДК 550.34

## СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАГНИТУДАМИ $MLH$ И $M_W$ ДЛЯ КУРИЛО-ОХОТСКОГО РЕГИОНА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕСЧЕТОВ В ДРУГИЕ МАГНИТУДЫ

© 2025 г. Д. А. Сафонов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,  
ул. Науки, 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия  
e-mail: d.safonov@imgg.ru

Поступила в редакцию 14.08.2024 г.

После доработки 23.09.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

В целях унификации каталога землетрясений Курило-Охотского региона получена двухсегментная линейная зависимость между магнитудой по поверхностной волне  $MLH$  Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН и моментной магнитудой  $M_W$  агентств GCMT и NIED. Сопоставление с аналогичными формулами по другим каталогам показало, что для сильных землетрясений ( $MLH = 6.5–8.1$ ) отмечается небольшое ( $\sim 0.1$ ) превышение региональной магнитуды  $MLH$  над  $M_S$  других каталогов. На интервале  $4.0–6.5$   $MLH$  превышает значения  $M_S$  на  $0.2–0.4$ . Получены зависимости между  $MLH$  и  $M_L$  Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН в районе Средних и Северных Курильских островов, а также между  $MLH$  и  $M_j$  агентства JMA для южной части региона. Транзитным пересчетом с использованием соотношения  $MLH(M_W)$  удалось повторить с хорошей точностью непосредственно полученные зависимости. Лучший результат был достигнут при учете различий в определении  $M_W$  разными агентствами.

**Ключевые слова:** землетрясение, магнитудные шкалы, регрессионные соотношения, Курило-Охотский регион

DOI: 10.31857/S0203030625010023, EDN: GIWJWF

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитуда землетрясения на настоящий момент остается самым простым и распространенным параметром измерения относительной величины сейсмического события. В региональных каталогах землетрясений обычно предпочтение отдается непосредственной оценке магнитуды, полученной сейсмологическим агентством по исходным данным, когда эпицентр землетрясения находится внутри сейсмической сети агентства. Однако ввиду большого количества различных способов определения магнитуды, методических подходов сейсмологических агентств, а также региональных особенностей затухания сейсмической энергии унификация каталогов землетрясений по магнитудному параметру предполагает

использование переходных соотношений между разными шкалами.

В течение длительного времени наиболее авторитетной магнитудной шкалой для сильных и умеренно-сильных землетрясений, анализирующей преимущественно записи телесейсмических сейсмостанций, остается магнитуда по поверхностной волне  $M_S$ . В последние десятилетия в связи с развитием различных способов оценки величины сейсмического момента  $M_0$  для все более слабых землетрясений и получения значений моментной магнитуды  $M_W$ , а также распространением шкал локальной магнитуды  $M_L$  магнитуду все реже определяют по поверхностной волне. Тем не менее из-за простоты и точности определения значений величины  $M_S$  этот способ измерения магнитуды остается номером один, например, для центров

предупреждения о цунами на Дальнем Востоке. Для соблюдения непрерывности и преемственности каталогов уточнение зависимости между магнитудами является актуальной задачей.

Шкала моментных магнитуд  $M_W$  в настоящее время признана наиболее авторитетной. Причинами этого являются, во-первых, привязка этой магнитудной шкалы к физически обоснованным величинам параметров очага землетрясения через сейсмический момент; во-вторых, отсутствие эффекта насыщения этой магнитуды в максимально большом диапазоне значений; в-третьих, как правило совпадающие до первого знака после запятой оценки этой магнитуды, получаемые разными агентствами с использованием различных методов. Практически любую новую вводимую в обращение магнитудную шкалу чаще всего сравнивают именно со шкалой моментных магнитуд. Это делает величину  $M_W$  удобной для использования в качестве прокси-магнитуды для транзитного перехода между различными магнитудными шкалами. Кроме того, моментную магнитуду или расчетный сейсмический момент делают основой унифицированных каталогов.

В каталоге Курило-Охотского региона Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской Академии Наук” (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в качестве основной магнитуды для унификации энергетических характеристик землетрясений используется магнитуда  $MLH$  (методический аналог  $M_S$ ). В статье [Сафонов, 2024] предложены переходные соотношения между магнитудой по поверхностной волне  $MLH$  каталога Курило-Охотского региона и моментной магнитудой  $M_W$ . Помимо этого, в ней представлены новые либо уточненные формулы связи других региональных магнитудных шкал с  $MLH$  и  $M_W$ , что позволяет привести величину землетрясений в соответствие с данными других каталогов с учетом региональных особенностей ее определения. Однако в указанной работе не решен ряд проблем, возникающих ввиду ограничения предложенных соотношений диапазоном слабых и умеренно-сильных землетрясений. Кроме того, для унификации каталогов региона по данным разных агентств необходимо связать переходными

соотношениями магнитуды этих агентств, что можно сделать как напрямую при наличии необходимого количества общих определений, так и транзитным пересчетом с использованием имеющихся формул.

Цель данной работы — расширить диапазон применимости зависимости между магнитудами  $MLH$  и  $M_W$  и использовать полученную зависимость для пересчета энергетических характеристик землетрясений между шкалами различных агентств.

Для этого были реализованы следующие задачи:

- 1) скомпилирован достаточно полный каталог пар значений магнитуд  $MLH$  и  $M_W$ ;
- 2) определен оптимальный вид межмагнитудной зависимости;
- 3) учтены особенности определения  $M_W$  различными агентствами;
- 4) получена двухсегментная зависимость  $M_W(MLH)$  методом ортогональной стандартной регрессии (OSR);
- 5) показано отличие данного соотношения от его аналогов;
- 6) показано использование полученной зависимости в качестве транзитной для переходных соотношений к магнитудам соседних региональных агентств.

## ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТУДЫ $M_S$

Исторически одной из первых массово применяемых магнитудных шкал стала предложенная Б. Гутенбергом в 1945 г. [Gutenberg, 1945] шкала на основе записи максимальных смещений  $A_{\max}$  в группе поверхностных волн землетрясений на горизонтальных компонентах сейсмографа на периодах  $T \approx 20$  с, рекомендованная к применению в диапазоне эпицентральных расстояний  $20^\circ \leq \Delta < 130^\circ$ . В 1962 г. была введена в употребление Пражская формула [Ванек и др., 1962] для магнитуды  $M_S(BB)$ , отличие которой состояло в использовании по предложению С.Л. Соловьева [1955] максимальной колебательной скорости  $V_{\max} = 2\pi(A/T)_{\max}$ , что позволило расширить применимость

магнитудной шкалы для большего диапазона периодов и близких расстояний ( $2^\circ \leq \Delta < 160^\circ$ ). Она также определялась по горизонтальным компонентам сейсмографов и стала основной магнитудой единой сети сейсмологических наблюдений (ЕССН) СССР и стран Восточной Европы.

Как указано в работе [Bormann et al., 2013], рекомендация использовать Пражскую формулу в качестве стандарта для расчета  $M_S$  в целом была принята мировым сейсмологическим сообществом. Однако сейсмологические агентства США решили использовать ее только на телесейсмических расстояниях  $20^\circ \leq \Delta < 160^\circ$  и для измерения амплитуд в диапазоне  $T = 18\text{--}22$  с в соответствии с оригинальной формулой и рекомендациями Гутенберга. Эта практика, основанная на замерах амплитуд колебательной скорости по записям длиннопериодных приборов, стала стандартной во всем западном сейсмологическом сообществе (соответствующая магнитуда имеет обозначение  $M_S(20)$ , или просто  $M_S$ ). При этом с началом применения более совершенной аналоговой, а затем и цифровой аппаратуры в измерении амплитуд и периодов произошел переход от горизонтальных компонентов сейсмографов к вертикальному. В настоящий момент стандартом для определения  $M_S$  является методика Геологической службы США [NEIC, 2024].

В СССР и странах Восточной Европы в практику определения магнитуды по поверхностной волне были введены две шкалы, получившие обозначение соответственно используемым каналам сейсмографа:  $MLH$  — по горизонтальным компонентам,  $MLV$  — по вертикальному.

Как показано, например, в работах [Горбунова и др., 1974; Bormann, Wylegalla, 1975], разница в результатах определения магнитуды по вертикальному каналу и горизонтальным оказалась незначительной и не выходит за пределы значений погрешности определения магнитуд. При этом снятие замеров по одному каналу проще, к тому же в записях вертикального канала часто обнаруживается меньше помех на частотах, характерных поверхностным волнам, чем в синхронных ему моментах записей горизонтальных каналов. Поэтому в данной работе будет принято  $MLV \approx MLH$ .

Согласно инструкции, которой руководствовались сотрудники ЕССН СССР [Инструкция ..., 1982], волна  $MLV$  определяется по амплитудам  $A_{\max}$  и соответствующим ей периодам  $T$ , замеренным на вертикальной составляющей в максимальной фазе волн Рэлея (что вынужденно отличается от измерений  $(A/T)_{\max}$ ). Магнитуда  $MLH$  определяется по полному горизонтальному вектору смещения, который рассчитывается по максимальным амплитудам и соответствующим им периодам на горизонтальных составляющих, замеренным в тот же момент времени, что и по вертикальной составляющей (допустима разница в полпериода). Во всех случаях используется одна и та же калибровочная кривая, рассчитанная для эпицентральных расстояний  $2^\circ\text{--}180^\circ$  (значения функции затухания, приводимые в виде таблицы, соответствуют “Пражской формуле” [Ванек и др., 1962], однако дистанция применимости увеличена). Для землетрясений Дальнего Востока, записанных на эпицентральных расстояниях до  $18^\circ$ , применяется отдельная таблица значений калибровочной функции [Соловьев, 1974], полученная на основе изучения землетрясений Курильских островов и Камчатки, записанных станциями Дальнего Востока СССР. Необходимость такой коррекции обосновывается существенным (до трех раз) уменьшением амплитуды поверхностных волн от этих землетрясений, записываемых региональными станциями.

Снятие замеров амплитуд для определения  $M_S(BB)$  ЕССН ( $MLV$  и  $MLH$ ) производилось по записям средне- и длиннопериодной аппаратуры СК и СКД [Аппаратура ..., 1974]. Вследствие перехода на цифровую регистрацию для определения  $MLV$  и  $MLH$  стала использоваться цифровая эмуляция этих приборов, что позволило каталогам сохранить преемственность определяемой магнитудной шкалы.

В современной практике магнитудных оценок ФИЦ ЕГС РАН [Маловичко и др., 2023; Габсатарова, Пойгина, 2024] энергетические параметры землетрясений сводного каталога приводятся к единой магнитуде  $M$  с опорой на магнитуду по поверхностной волне на вертикальной компоненте сейсмографа —  $M_S^{\text{MOS}}(MLV)$ , определяемой согласно инструкции ЕССН [Инструкция ..., 1982], в некоторых

случаях также привлекается  $M_S^{ISC}$  (из бюллетеней ISC). Для неглубоких землетрясений условно принимается  $M = M_S^{MOS} = M_S^{ISC} = MLH$ .

Шкала  $M_S(20R)$ , являющаяся модификацией  $M_S(20)$ , используется на Дальнем Востоке России для близких расстояний 80–3000 км [Чубарова и др., 2010; Чубарова, Гусев, 2017]. Она совмещает достоинства  $M_S(20)$  и  $M_S(BB)$  и применяется для измерения сильных региональных землетрясений.

В международном сейсмологическом центре (ISC) [Bondar, Storchak, 2011; Di Giacomo et al., 2015] расчет  $M_S^{ISC}$  осуществляется по большому числу станционных измерений амплитуд и периодов поверхностной волны, предоставляемых различными сейсмологическими агентствами, на основе Пражской формулы в диапазоне периодов волн  $T = 10–60$  с на эпицентральных расстояниях  $20°–160°$ . При этом принимаются в расчет данные как вертикального, так и горизонтальных каналов сейсмографа. Как было показано, например, в работе [Scordilis, 2006], разница между  $M_S^{NEIC}$  и широкополосной  $M_S^{ISC}$  незначительна.

Основные недостатки магнитуды по поверхностной волне следующие: насыщение на значениях выше  $M_S \approx 8.2$ ; необходимость для определения длиннопериодной аппаратуры, записывающей периоды колебаний до  $T \approx 20$  с, – такой аппаратурой комплектуются далеко не все пункты регистрации; магнитуда доступна только для умеренно-сильных и сильных событий, не определяется на близких дистанциях (менее  $2°$  для  $M_S(BB)$  и менее  $20°$  для  $M_S(20)$ ); возможность корректного определения магнитуды глубоких ( $h > 80$  км) землетрясений достаточно дискуссионная [Petrova, Gabsatarova, 2020].

В последние десятилетия в связи с распространением  $M_W$  магнитуда по поверхностной волне перестает быть основой каталогов, хотя и не выходит полностью из употребления. Так, на сайте геологической службы США USGS [NEIC, 2024] о магнитуде  $M_S(20)$  говорится следующее: “Она учитывается NEIC, но редко используется как авторитетная, поскольку при этих магнитудах [ $\sim 5.0–8.5$ ] почти всегда доступна  $M_W$ .  $M_S$  значима в первую очередь при сильных ( $> 6$ ) неглубоких землетрясениях, обеспечивая повторное подтверждение их величины”.

В региональных каталогах ФИЦ ЕГС РАН также довольно часто основной магнитудой сейчас принимается  $M \approx M_W$ ,  $M \approx M_L$  (локальная магнитуда по объемным волнам). Магнитуда  $M_S$  определяется на постоянной основе только для наиболее сильных событий. В Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН [Фокина и др., 2023] все энергетические характеристики землетрясений приводятся с помощью межмагнитудных соотношений в порядке приоритета использования к магнитуде  $M = MLH$ , хотя непосредственно  $MLH$  определяется довольно редко и по малому числу преимущественно региональных сейсмостанций. После включения в каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН региональной моментной магнитуды  $M_{Wper}$  [Сафонов, Коновалов, 2017] приоритет  $M_W$  стал выше, чем  $MLH$ , однако условно принимается  $M_{Wper} \approx MLH$ .

### ВЫБОР ВИДА РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $M_W(MLH)$

Изначально из логики перехода от величины сейсмического момента к магнитуде с использованием формулы для энергии Гутенберга–Рихтера следовало, что  $M_S = M_W$  [Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979], однако это применимо только для сильных землетрясений с  $M_S > 6.8$  [Ekström, Dziewonski, 1988; Bormann et al., 2013].

Изучению этой взаимосвязи на больших объемах данных различных каталогов посвящено множество работ. В работе [Ekström, Dziewonski, 1988] предложена трехсегментная зависимость между  $M_0$  по данным GCMT [GCMT, 2024] и  $M_S$  в диапазоне значений  $M_S = 4.5–7.5$ . При этом средний сегмент зависимости представлен степенной функцией для плавного перехода. Его исключение и использование двух крайних линейных формул на диапазоне до их пересечения вблизи значения  $M_S = 6.2$  приводит к потере в точности расчета всего в 0.1 магнитудной единицы (м.е.).

В работе [Scordilis, 2006] представлена двухсегментная зависимость между  $M_S$  и  $M_W$  (здесь и далее  $Se$  – стандартная ошибка регрессии,  $N$  – размер выборки):



$$3.0 \leq M_S \leq 6.1 : M_W = 0.67(\pm 0.005 M_S + 2.07(\pm 0.03)), \\ Se = 0.17, N = 23921; \quad (1)$$

$$6.2 \leq M_S \leq 8.2 : M_W = 0.99(\pm 0.02) M_S + 0.08(\pm 0.13), \\ Se = 0.20, N = 2382. \quad (2)$$

Предварительно исследовано соответствие определений  $M_W$  по данным NEIC [NEIC, 2024] и GCMT [GCMT, 2024], а также  $M_S^{ISC}$  и  $M_S^{NEIC}$ , показавшее их незначительные различия. Также сравнивались зависимости  $M_W(M_S^{ISC})$  и  $M_W(M_S(BB))$  по данным европейского каталога [Karnik, 1996], продемонстрирована значительная разница в пересчете, увеличивающаяся с уменьшением магнитуды землетрясений.

В работе [Di Giacomo et al., 2015] по данным каталога ISC-GEM получена двухсегментная линейная зависимость  $M_S^{ISC}$  от  $M_W$ , довольно похожая на приведенную в работе [Scordilis, 2006], а также экспоненциальная зависимость

$$M_W = e^{(-0.222 + 0.233 M_S)} + 2.263. \quad (3)$$

Зависимость между  $M_S$  и  $M_W$  исследуется в работе [Das et al., 2011] на основе данных различных глобальных каталогов, в работе [Lolli et al., 2014] — на основе онлайн бюллетеня ISC; в статье [Cheng et al., 2017] — на основе каталога землетрясений Китая.

Для Дальневосточного региона РФ наиболее актуальной остается работа [Гусев, Мельникова, 1990], где рассчитана связь магнитуд дальневосточных землетрясений с  $M_W$  по данным различных агентств, сопоставленных друг с другом. В этой работе найдены нелинейные зависимости между сейсмическим моментом и отдельно  $M_S$  Гутенберга,  $M_S(20)$  и  $M_S(BB)$ , представленные в табличном и графическом виде.

Также актуальна для всей территории России работа [Petrova, Gabsatarova, 2020], посвященная уточнению магнитудных поправок к  $M_S^{MOS}$  в зависимости от глубины очага землетрясений Северной Евразии. В этой работе для землетрясений с  $h \leq 40$  км предложена трехсегментная линейная зависимость между  $M_S^{MOS}$ , определяемой в ФИЦ ЕГС РАН и публикуемой в Сейсмологическом каталоге [Сейсмологический каталог, 2024], и  $M_W$  по данным ISC-GEM [Di Giacomo et al., 2018]:

$$M_W < 5.9 : M_S^{MOS} = 1.577 M_W - 3.47; \quad (4)$$

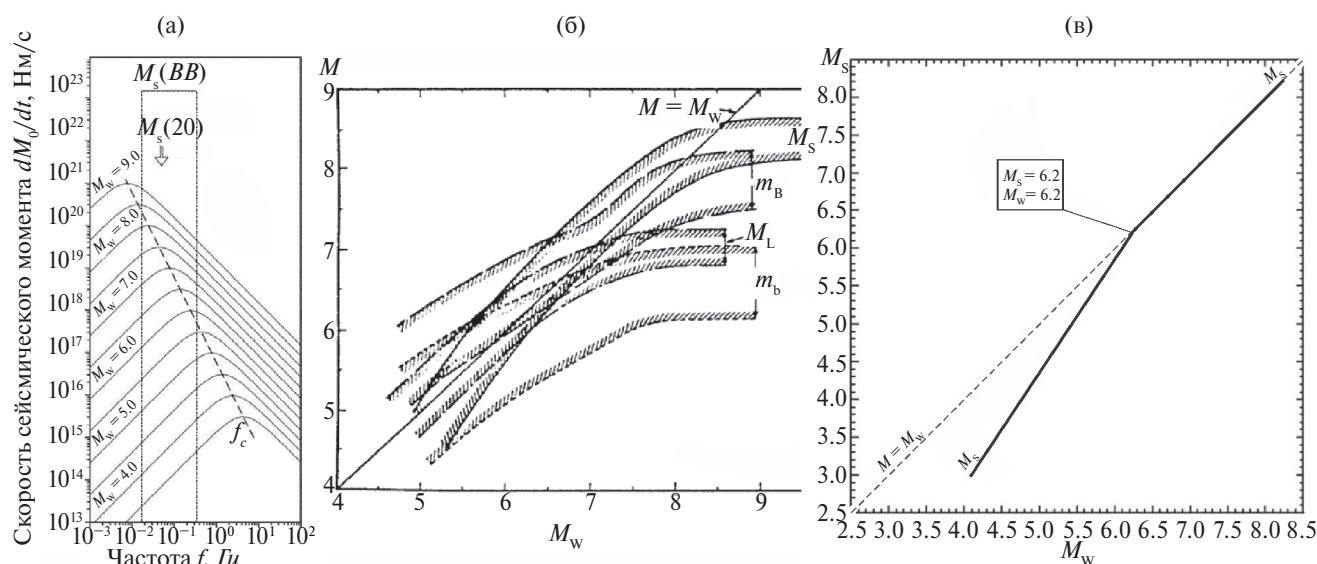
$$5.9 \leq M_W \leq 7.0 : M_S^{MOS} = 1.182 M_W - 1.15; \quad (5)$$

$$M_W > 7.0 : M_S^{MOS} = 0.84 M_W + 1.3. \quad (6)$$

Также в этой работе показано небольшое, но значимое отличие  $M_S^{MOS}$  от  $M_S^{ISC}$ , для которых представлена линейная зависимость.

Общим для зависимостей  $M_S(M_W)$  (или  $(M_W(M_S))$ ) является изгиб получаемой кривой в области значений  $M_S \approx 6.2$ , когда видимая пропорциональность  $M_W \approx M_S$  на определенном участке нарушается. На рис. 1а показан частотный диапазон применения магнитудной шкалы  $M_S(BB)$  [Bormann et al., 2013]. Как видно из рисунка, в этот диапазон попадает характерная угловая частота землетрясений  $f_c$  с моментной магнитудой  $6.0-6.5 < M_W < 8.0-8.5$ . В этом диапазоне можно ожидать адекватную оценку сейсмической энергии по группе поверхностных волн и примерное равенство  $M_W \approx M_S(BB)$ . За пределами этого интервала, как показано в работах [Kanamori, 1983; Bormann et al., 2013], можно ожидать нарастающую недооценку величины землетрясения по шкале  $M_S(BB)$  в сопоставлении с  $M_W$  (см. рис. 1б). Таким образом, зависимость  $M_S(BB)$  от  $(M_W)$  можно условно разбить на три интервала:  $M_S(BB) > 8.0-8.5$ ,  $M_S(BB) \approx 6.5-8.0$  и  $M_S(BB) < 6.0-6.5$ . Понятно, что частота поверхностных волн каждого отдельного землетрясения может отличаться при измерениях на разных сейсмостанциях в зависимости от эпицентрального расстояния и типа земной коры на пути распространения волны, а граница между этими интервалами будет размытой. Поэтому можно ожидать, особенно с учетом разброса оценки магнитуды, плавный переход между разными сегментами с возможностью описать всю зависимость кривой, как это сделано, например, в работах [Гусев, Мельникова, 1990; Di Giacomo et al., 2015]. Однако и в том, чтобы использовать сегментированную линейную зависимость, тоже есть определенный смысл, особенно для  $M_S(BB)$  с учетом достаточно широкого диапазона частот, в котором она измеряется. При этом точку перехода одного соотношения в другое можно выбирать в некотором диапазоне в зависимости от удобства.

Сложность в получении зависимости представляет первый интервал  $M_S(BB) > 8.0-8.5$



**Рис. 1.** Скорость смещения грунта как функция частоты для “средних” сейсмических источников, масштабированных по  $M_0$  и  $M_W$ ; стрелкой показана частота определения магнитуды  $M_s(20)$ , рамкой — диапазон частот, в пределах которого измеряются максимальные амплитуды волн Рэлея для  $M_s(BB)$  [Bormann et al., 2013] (a); приблизительные соотношения и диапазоны изменчивости  $M_L$ ,  $m_b$ ,  $m_B$  и  $M_s$  относительно  $M_W$ , согласно [Kanamori, 1983] (б); принципиальный вид зависимости между  $M_W$  и  $M_s$  из работы [Scordilis, 2006] (в).

для наиболее сильных землетрясений, которые редки, зато определяются большим количеством телесейсмических сейсмостанций, поэтому такая зависимость возможна только для глобального каталога за длительный период измерений. В каталоге Курило-Охотского региона в период прямых измерений магнитуды землетрясений с  $MLH > 8.5$  нет, события  $MLH > 8.0$  за последнюю половину века отмечены лишь трижды, поэтому первый сегмент зависимости не актуален.

Второй интервал нам более интересен, так как примерное равенство  $M_W \approx M_s(BB)$  все же не соблюдается с высокой точностью, вместе с тем сильные региональные события также хорошо регистрируются мировой сетью, а потому расхождения в результатах определения  $M_s$  являются скорее следствием методических особенностей агентств, чем регионального затухания сейсмических волн. Полученную зависимость можно сопоставить с зависимостями других агентств и регионов, при этом можно ожидать их примерного совпадения. Вместе с тем сильные землетрясения в небольшом регионе происходят не часто, поэтому для сопоставления необходим длительный интервал наблюдений и обработки по единой методике. Это условие достаточно хорошо соблюдается для каталога Курило-Охотского региона.

Для третьего интервала ( $M_s(BB) < 6.0–6.5$ ) возникает другая сложность — нижняя граница магнитудных определений. Для каталога GCMT [GCMT, 2024], наиболее авторитетного для получения межмагнитудных зависимостей с использованием  $M_W$ , в пределах региона граница составляет  $M_W \approx 4.9$  и является излишне резкой. Потому необходимо привлечь дополнительные данные для увеличения диапазона сравниваемых значений магнитуд — для этого был использован каталог землетрясений агентства NIED, Япония [NIED, 2024].

Таким образом, наиболее проста в получении и дальнейшем применении двухсегментная зависимость  $M_W(MLH)$  в диапазоне значений  $MLH \leq 8.1$ , подобная той, что получена для  $M_s$  в работе [Scordilis, 2006] (см. рис 1в). Она позволяет охватить весь диапазон доступных значений  $MLH$  каталога Курило-Охотского региона.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Курило-Охотский регион (рис. 2), входящий в зону ответственности за регистрацию землетрясений Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, включает в себя южную часть акватории Охотского моря, Курильские острова, о. Хоккайдо и северную часть Японского моря. В период существования каталога его границы

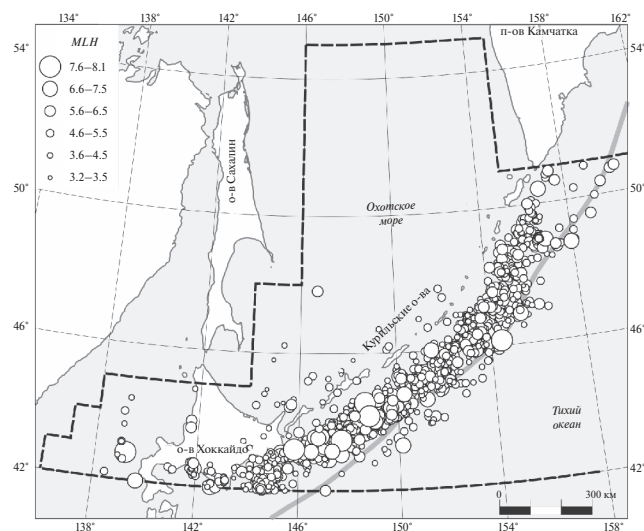


Рис. 2. Эпицентры землетрясений Курило-Охотского региона 1968–2022 гг. с глубиной очага  $h \leq 80$  км.

Штриховой линией показаны максимальные границы Курило-Охотского региона.

несколько менялись (на рис. 2 показаны границы региона, включающие все входившие в него территории). Каталог землетрясений региона составлялся до 2022 г. отделом сводной обработки сейсмологических данных филиала на основе как записей региональных и телесеизмических сейсмостанций, принадлежащих организации, так и данных, получаемых из различных доступных источников. Каталог Курило-Охотского региона ежегодно публикуется журналом “Землетрясения Северной Евразии” и ежегодником “Землетрясения России” Издательства Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” [Фокина и др., 2023; Фокина и др., 2024 и др.], где Сахалинский филиал фигурирует под кодом агентства “SAGSR”. Каталог за более ранние годы публиковался в сборниках “Землетрясения в СССР”. Данные также доступны в бюллетенях ISC [ISC, 2024], где можно встретить старые коды агентства “SKL” и “SKHL”.

Каталог Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН содержит восемь различных региональных энергетических характеристик землетрясений: помимо  $MLH$  это магнитуды по объемным волнам (методические производные  $m_B$ )  $MPV$ ,  $MPVA$ ,  $MPH$ ,  $MSH$ ,  $MSHA$  [Инструкция ..., 1982], энергетический класс землетрясений С.Л. Соловьева  $K_C$  [Соловьев, Соловьева, 1967] и региональная моментная магнитуда  $M_{w\text{рег}}$  [Сафонов, Коновалов, 2017]. В зависимости

от величины и глубины очага землетрясения доступны различные магнитуды из этого перечня. Переход к унифицированной расчетной магнитуде  $M = MLH \approx M_{w\text{рег}}$  осуществляется по формулам, полученным более полувека назад [Фокина и др., 2023]. Методика определения  $MLH$  описана выше и соблюдается в течение всего времени существования каталога.

В статье [Сафонов, 2024] автором было предложено новое линейное переходное соотношение между магнитудой по поверхностной волне  $MLH$  каталога Курило-Охотского региона и моментной магнитудой  $M_w$ :

$$4.0 \leq M_w \leq 7.0 : MLH = 1.24(\pm 0.03) M_w - 1.48(\pm 0.17),$$

$$Se = 0.173, N = 1158, \quad (7)$$

а также между этими двумя магнитудами и другими энергетическими характеристиками каталога. Предложенные переходные формулы рекомендованы к использованию в интервалах магнитуд  $M_w \sim 3.5–7.0$ . Этих соотношений достаточно для оценки величины умеренно-сильных землетрясений, однако для более сильных их применение дает нереалистичный результат. Также при исследовании не проводилось различий между значениями  $M_w$ , полученными из разных источников, так как они полагались незначительными. Тем не менее получаемые оценки моментной магнитуды все-таки имеют некоторую зависимость от определяющего агентства.

Для Курило-Охотского региона доступны, помимо прочих, результаты определения моментной магнитуды агентства (GCMT, США), региональных агентств (NIED, Япония) и Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (SAGSR).

Каталог агентства NIED доступен с 1997 г. для южной части Курило-Охотского региона (до 49° с.ш.), однако он включает только события магнитудой  $M_w \geq 3.5$ , поэтому, несмотря на большое количество магнитудных определений в целом, он содержит ограниченное число значений для сильных событий, что делает каталог слабо представительным в этом диапазоне. Каталог GCMT охватывает более длительный период времени и землетрясения всего региона, однако ограничен снизу по магнитуде  $M_w \approx 4.9$ , причем резкая граница нарушает нормальное распределение магнитудной ошибки.



Совместное использование каталогов сглаживает их недостатки.

Предварительно было исследовано соответствие значений магнитуд  $M_W$  для землетрясений, присутствующих одновременно в каталогах NIED и GCMT, в пределах Курило-Охотского региона (рис. 3), для сравнения также использовалась  $M_{W\text{per}}$  SAGSR:

$$M_W^{\text{NIED}} = 1.04(\pm 0.03) M_W^{\text{GCMT}} - 0.29(\pm 0.17),$$

$$Se = 0.081, N = 658; \quad (8)$$

$$M_{W\text{per}} = 1.01(\pm 0.03) M_W^{\text{GCMT}} - 0.13(\pm 0.16),$$

$$Se = 0.061, N = 221; \quad (9)$$

$$M_{W\text{per}} = 0.99(\pm 0.02) M_W^{\text{NIED}} + 0.02(\pm 0.09),$$

$$Se = 0.076, N = 327. \quad (10)$$

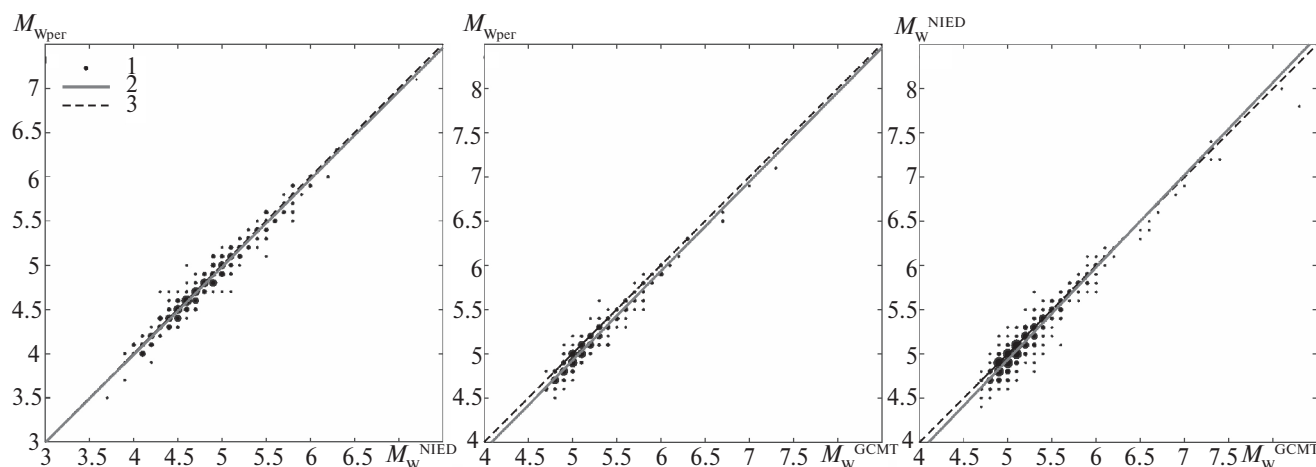
Получено небольшое устойчивое занижение  $M_W^{\text{NIED}}$  и  $M_{W\text{per}}$  относительно  $M_W^{\text{GCMT}}$  (в среднем приблизительно 0.05–0.07 магнитудных единиц в доступном для определения диапазоне), разница между  $M_W^{\text{NIED}}$  и  $M_{W\text{per}}$  составила ~0.02 м.е. С учетом обычной практики округления магнитудных значений до первого знака после запятой и средней стандартной ошибки моментной магнитуды в 0.09–0.18 м.е. [Wason et al., 2018] в большей части случаев для оценки величины отдельных землетрясений такое различие несущественно, однако систематическое смещение может оказать влияние на переходные соотношения.

Отличный от единицы коэффициент наклона прямой  $M_W^{\text{NIED}}(M_W^{\text{GCMT}})$  также прослеживается в работе [Kubo et al., 2002] при сравнении определений сейсмических моментов для всего региона Японии: происходит возрастающая с уменьшением магнитуды недооценка величины сейсмического момента по данным NIED (см. рис. 3) либо переоценка по данным GCMT.

Так как каталог GCMT содержит мало событий Курило-Охотского региона магнитудой  $M_W < 4.9$ , нет возможности оценить соотношение  $M_W^{\text{NIED}}(M_W^{\text{GCMT}})$  для более слабых землетрясений. Согласно полученной линейной зависимости (8), для  $M_W = 4.9$  средняя разница в оценке моментной магнитуды между GCMT и NIED составляет существенные  $\mu = 0.09$  м.е.

Если предположить, что сейсмический момент слабых региональных землетрясений лучше оценивается региональным агентством NIED, можно пренебречь найденным несоответствием и совместить каталоги без его учета. В этом случае можно получить зависимость между  $MLH$  и условной моментной магнитудой без привязки к агентству определения. Такой вариант (см. зависимость (7)) принят автором в работе [Сафонов, 2024].

Другая возможность — предположить, что с уменьшением магнитуды событий линейная зависимость (8) сохраняется, и скорректировать  $M_W$ . В этом случае слабым землетрясениям магнитудой  $M_W^{\text{NIED}} = 3.5$  будет соответствовать  $M_W^{\text{GCMT}} = 3.64$ , что повлияет на наклон



**Рис. 3.** Зависимость между моментными магнитудами  $M_W$  по данным агентств SAGSR, NIED и GCMT. 1 — положение пар значений магнитуды (размер пропорционален количеству данных в точке); 2 — регрессионная прямая, полученная методом OSR; 3 — линия равных значений магнитуд (1:1).



регрессионной прямой, насколько существенно — будет показано ниже. Такой подход применен в данной работе.

Для выполнения исследования собран каталог землетрясений Курило-Охотского региона за 1968–2022 гг. Основную часть ( $N = 1676$ ) результатов измерений магнитуды  $MLH$  составили данные Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 1981–2019 гг., опубликованные в сборниках “Землетрясения в СССР” и журнале “Землетрясения Северной Евразии”. Для увеличения количества сильных землетрясений в выборку добавлены 77 событий из бюллетеня ISC [ISC, 2024] за 1968–1980 гг., где в качестве  $MLH$  учитывалась магнитуда  $M_S$  по данным агентства SKL, а в случае отсутствия — близкая ей по методике определения и используемой сети сейсмостанций  $M_S^{MOS}$ , в предположении, что  $M_S^{MOS} \approx MLV \approx MLH$ . Также использованы данные из фондов СФ ФИЦ ЕГС РАН 2020–2022 гг., готовящиеся к публикации ( $N = 34$ ).

Моментная магнитуда для выборки заимствовалась из каталога GCMT [GCMT, 2024; ISC, 2024] (1101 событие), дополненного скорректированными по зависимости (8) данными агентства NIED [NIED, 2024] за 1997–2022 гг. (686 событий). Для сравнения принимались землетрясения с глубиной очага в пределах  $h = 0–80$  км. Региональные определения  $M_{Wper}$  не учитывались, так как почти все обработанные события присутствуют в двух используемых каталогах. Это позволило подготовить более представительный каталог, чем в работе [Сафонов, 2024], особенно в диапазоне сильных землетрясений  $MLH > 7.0$ , число которых увеличилось почти вдвое. Всего в выборке 1787 событий в интервалах магнитуд  $MLH = 3.0–8.1$ ,  $M_W = 3.7–8.3$  (см. рис. 1).

Расчет межмагнитудных соотношений производился методом ортогональной стандартной регрессии (OSR), поскольку стандартная ошибка определения магнитуды  $MLH$  по данным каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН, как показано в работе [Сафонов, 2024], близка к ее величине для  $M_W$ , а их отношение укладывается в диапазон  $0.7 < \eta < 1.8$ , рекомендованный авторами статьи [Bormann et al., 2013]. Как и в работе [Сафонов, 2024], непосредственно в расчетах использован алгоритм “deming” для Matlab [Hall, 2024], адаптированный для целей данной работы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4а показаны собранные для получения зависимости  $MLH(M_W)$  1787 пар магнитудных значений землетрясений с эпицентрами в пределах Курило-Охотского региона. При этом явная нелинейность полученного облака значений очевидна даже “на глаз” и подтверждается положением средних точек, построенных для фрагментов каталога, отобранных ортогонально линии равных значений магнитуд (1:1) с интервалом в 0.2 величины  $(MLH + M_W)/2$ . Чтобы избежать эффекта обрезки каталога, выборка была разделена ортогонально средней линии на участке, где  $MLH \approx M_W$ . Для увеличения количества событий “верхнего” фрагмента сделано перекрытие диапазона выборок на 0.5 м.е. Таким образом, “нижний” фрагмент —  $(MLH + M_W)/2 \leq 6.5$ , 1703 пары значений; “верхний” —  $(MLH + M_W)/2 \geq 6.0$ , 145 пар. Далее методом ортогональной стандартной регрессии получено соотношение  $MLH(M_W)$  для “нижней” и “верхней” частей каталога. Пересечение двух полученных прямых произошло в месте перекрытия фрагментов вблизи магнитуд  $M_W = 6.1–6.2$  и  $MLH = 6.2–6.3$  — эти значения можно принять в качестве точки перегиба линейной зависимости. С учетом области фактического наличия данных полученная зависимость  $MLH(M_W)$  и диапазон ее применения имеют вид

$$4.0 \leq M_W \leq 6.1, 3.2 \leq MLH \leq 6.2 :$$

$$MLH = 1.42(\pm 0.03) M_W - 2.43(\pm 0.15),$$

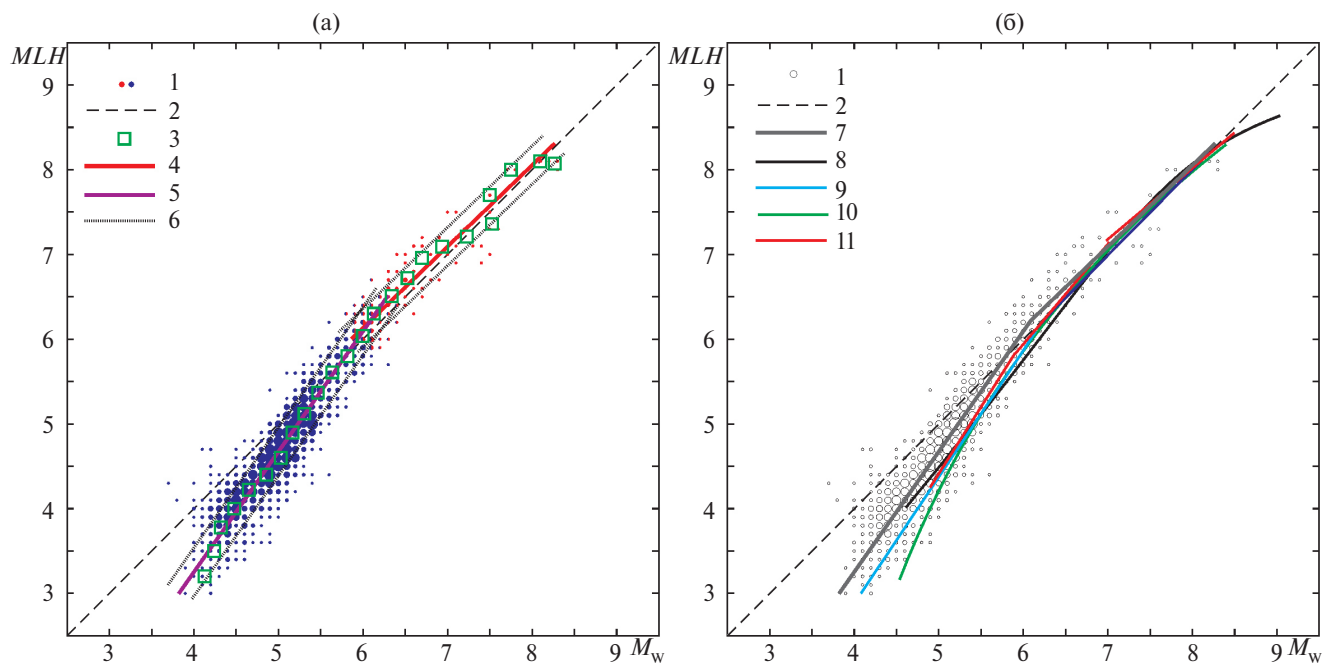
$$N = 1734, Se = 0.164; \quad (11)$$

$$6.2 \leq M_W \leq 8.1, 6.3 \leq MLH \leq 8.1 :$$

$$MLH = 0.96(\pm 0.08) M_W + 0.37(\pm 0.50),$$

$$N = 145, Se = 0.161. \quad (12)$$

На рис. 4б приведены соотношения  $M_S(M_W)$  для некоторых упоминавшихся выше работ. Это криволинейные зависимости для  $M_S(BB)$  из работы [Гусев, Мельникова, 1990] и  $M_S^{ISC}$  [Di Giacomo et al., 2015], а также сегментированные зависимости для  $M_S$  из работы [Scordilis, 2006] и  $M_S^{MOS}$  из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020]. Можно отметить, что в верхнем магнитудном диапазоне  $M_W \sim 7.0–8.2$  все зависимости очень близки и укладываются в интервал значений  $\Delta M = 0.1$  м.е., что сравнимо с точностью определения магнитуд. Расчетные значения широкополосных  $M_S^{MOS}$  и  $MLH$  превышают значения  $M_S$ , что отмечалось еще в ранних работах:



**Рис. 4.** Зависимость магнитуды  $MLH$  каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН от  $M_W$  по данным агентств GCMT и NIED.

а – получение двухсегментной зависимости (1 – положение пар значений магнитуды; 2 – линия равных значений магнитуд (1:1); 3 – средние значения магнитуд на интервалах в 0.2 м.е., отложенных ортогонально линии (1:1); 4, 5 – регрессионные прямые, полученные методом OSR, для “верхнего” и нижнего фрагментов соответственно; 6 – интервал стандартной ошибки регрессии  $Se$ ); б – сравнение полученной зависимости с вариантами  $M_S(M_W)$  из других работ (7 – полученная зависимость  $MLH(M_W)$ ; 8 – [Гусев, Мельникова, 1990]; 9 – [Scordilis, 2006]; 10 – [Di Giacomo et al., 2015]; 11 – [Petrova, Gabsatarova, 2020]).

например, в работе [Халтурин, 1974] получено соотношение  $M_S = MLH - 0.15$ .

Расхождение расчетных значений ниже этого диапазона для  $M_W = 6.0-7.0$  в разных работах главным образом возникает из-за того, что авторы по-разному преодолевают изгиб зависимости. Можно сгладить этот участок дополнительным сегментом, как в работах [Ekström, Dziewonski, 1988; Petrova, Gabsatarova, 2020], однако при дополнительном делении каталога диапазон магнитуд для расчета сократится, что ухудшит результат регрессии. Скорее всего по этой причине сегментированная зависимость из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020] терпит небольшой разрыв при совмещении верхних, наименее представительных сегментов. Кроме того, если судить по положению средних значений интервалов в 0.2 м.е., плавного перегиба между линейными участками не отмечается, потому был выбран показанный на рис. 4 вариант двухсегментной зависимости.

Ниже значения  $M_W = 6.2$  предлагаемая региональная зависимость дает большие оценки магнитуды, чем остальные приведенные соотношения. Наклон “нижнего” сегмента меньше, чем всех остальных, кроме нижней части кривой [Гусев, Мельникова,

1990]. Разница в значениях  $MLH$  при пересчете на уровне самых слабых событий ( $M_W = 4.0$ ) следующая: со значением  $M_S^{\text{MOS}} - \Delta M = 0.41$  м.е. [Petrova, Gabsatarova, 2020], с  $M_S - \Delta M = 0.37$  м.е. [Scordilis, 2006], что довольно много. Следовательно, использование предлагаемой зависимости для Курило-Охотского региона действительно имеет смысл и позволит точнее приводить энергетические характеристики региональных землетрясений по данным SAGSR в соответствии с данными других агентств.

Интересно также сравнить зависимости  $MLH(M_W)$  на интервале магнитуд относительно слабых событий, полученные с помощью разных подходов составления каталога, которые описывались выше. На рис. 5 показаны пары значений  $MLH$  и  $M_{W_{\text{per}}}$  Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН из регионального каталога за 2012–2022 гг. Помимо регрессионной прямой по этим данным:

$$MLH = 1.37 \pm 0.12 M_{W_{\text{per}}} - 2.12 \pm 0.64, \\ N = 134, Se = 0.150, \quad (13)$$

показана зависимость  $MLH(M_W^{\text{NIED}})$ , рассчитанная с использованием только  $M_W$  из каталога NIED [NIED, 2024] для того же региона за 1997–2022 гг.:

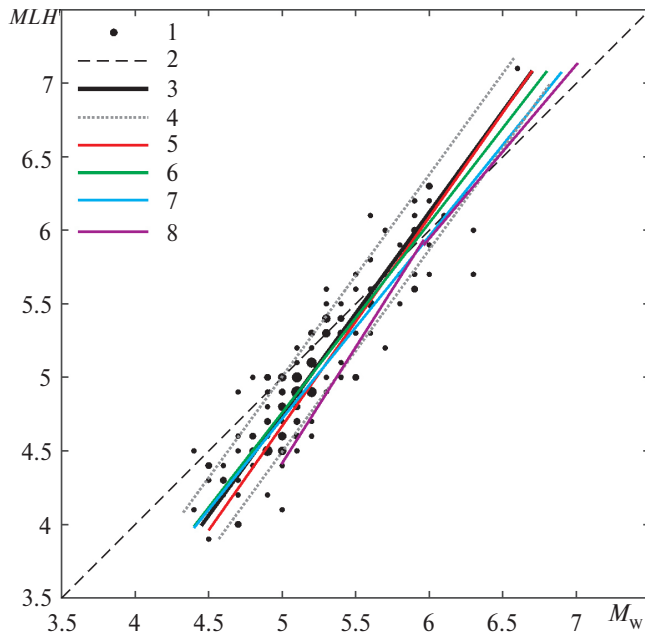


Рис. 5. Зависимость магнитуды  $MLH$  от  $M_{wper}$  каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН 2012–2022 гг.

1 – положение пар значений магнитуды; 2 – линия равных значений магнитуд (1:1); 3 – регрессионная прямая  $MLH(M_{wper})$ , полученная методом OSR; 4 – интервал стандартной ошибки регрессии  $Se$ ; 5, 6 – соответственно зависимости (11) и (13) из данной работы; 7 –  $MLH(M_w)$  из работы [Сафонов, 2024]; 8 –  $M_s^{MOS}(M_w)$  из статьи [Petrova, Gabsatarova, 2020].

$$MLH = 1.29(\pm 0.04) M_w^{NIED} - 1.69(\pm 0.19),$$

$$N = 1137, Se = 0.181, \quad (14)$$

а также “нижняя” зависимость (11) и зависимость (7) по совместным данным GCMT [GCMT, 2024] и NIED [NIED, 2024] без коррекции последних из работы [Сафонов, 2024].

Как видно из рис. 5, все прямые лежат довольно близко: для верхнего диапазона применимости ( $M_w = 6.1$ ) разница в расчетах составляет до  $\Delta M = 0.15$  м.е., для  $M_w = 4.0$  – до  $\Delta M = 0.16$  м.е. Приведенная здесь для сравнения часть зависимости [Petrova, Gabsatarova, 2020], наиболее близкая методически, но полученная по данным каталога землетрясений Северной Евразии, все же показывает существенно большее отличие. Использование разных подходов при составлении регионального каталога меньше влияет на результат, чем привлечение данных из других регионов. Помимо этого, в некоторых регионах России отмечена существенная разница в определении  $M_s^{MOS}$  и региональной  $MLH$ . Вероятно, и для Курило-Охотского

региона следует уточнить соотношение между этими магнитудами.

### ПРИМЕНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ $MLH(M_w)$ ДЛЯ ПЕРЕХОДНЫХ СООТНОШЕНИЙ К МАГНИТУДАМ СОСЕДНИХ РЕГИОНАЛЬНЫХ АГЕНТСТВ

Курильская островная дуга входит в состав Курило-Камчатской субдукционной системы – важного и интересного для изучения геотектонического объекта. За регистрацию землетрясений здесь в Единой геофизической службе РАН ответственны два филиала: Камчатский [Chebrov et al., 2013; Chebrova et al., 2020] и Сахалинский. В двух соседних филиалах накопились существенные методические различия в оценках энергетических характеристик землетрясений. В Камчатском филиале (агентство KAGSR) основными энергетическими характеристиками землетрясений являются класс С.А. Федотова по максимуму смещения в группе S-волн [Федотов, 1972]  $K_s$  и локальная магнитуда  $M_L$ , пересчитываемая из  $K_s$  [Chebrov et al., 2013]. Для сильных и умеренно-сильных землетрясений с использованием нескольких подходов определяется региональная моментная магнитуда  $M_w$ .

Как упоминалось выше, в SAGSR также определяется энергетический класс землетрясений, разработанный С.Л. Соловьевым и О.Н. Соловьевой [Соловьев, Соловьева, 1967] для Курило-Охотского региона. Энергетический класс определяется для наиболее слабых землетрясений, а потому является наиболее массовой энергетической характеристикой землетрясений и может служить основой для составления каталогов либо основной пересчитываемой величиной, как и в KAGSR.

Несмотря на то, что  $K_s$  и  $K_c$  разрабатывались параллельно для смежных регионов, в методиках их получения есть существенное различие. Так его оценил С.А. Федотов [Федотов, 1972]:

$$K_c = K_s - 0.6. \quad (15)$$

Спустя более полувека можно проверить соблюдение этой зависимости.

Каталоги Сахалинского и Камчатского филиалов ФИЦ ЕГС РАН пересекаются в довольно небольшой области на границе зон

ответственности филиалов в районе Средних и Северных Курильских островов. Во избежание эффекта обрезки данные SAGSR до 2007 г. не использовались, поскольку в более ранних каталогах вводилось ограничение для публикации  $K_C < 9$ . В каталоге Камчатского филиала действует ограничение по энергетическому уровню  $K_S < 8.5$ , однако в районе, по которому составлена выборка, это ограничение не достигается. Всего в выборку с 2007 по 2022 г. попало 175 землетрясений энергетического уровня  $K_C = 7.9\text{--}14.0$  и  $K_S = 8.6\text{--}14.6$  [Chebrova et al., 2020] (см. рис. 6). Методом ортогональной стандартной регрессии получено соотношение  $K_C(K_S)$ :

$$9 \leq K_S \leq 14, 8 \leq K_C \leq 13 : K_C = 1.00 \pm 0.05, \\ K_S - 0.72 \pm 0.58, Se = 0.301, N = 175. \quad (16)$$

Как видно из полученного соотношения, разница между классами для всего диапазона значений возросла за прошедшую половину века с 0.6 ед. до 0.7 ед. Равенство коэффициента наклона прямой строго единице — случайность, тем не менее совпадение этого коэффициента с полученным ранее [Федотов, 1972] показывает

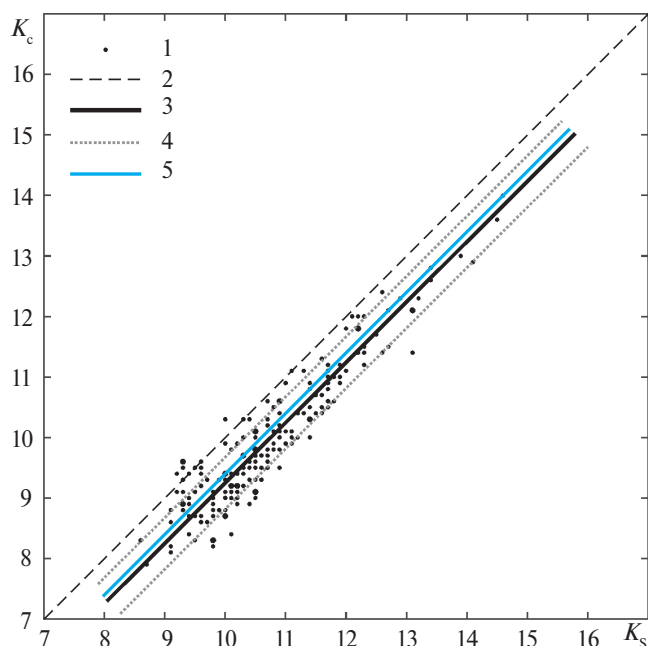


Рис. 6. Зависимость между энергетическими классами Федотова  $K_S$  и Соловьева  $K_C$  в регионе Средних и Северных Курильских островов за 2007–2022 гг.

1 — положение пар значений энергетического класса; 2 — линия равных значений (1:1); 3 — регрессионная прямая  $K_C(K_S)$ , полученная методом OSR; 4 — интервал стандартной ошибки регрессии  $Se$ ; 5 — соотношение  $K_C(K_S)$  из работы [Федотов, 1972].

хорошую устойчивость применяемых шкал. Причина небольшого увеличения расхождения может состоять в переходе с аналоговой на цифровую регистрацию землетрясений и в изменившемся в связи с этим способе снятия замеров.

Для единообразия применяемых формул не лишним будет получить зависимость  $MLH$  от  $K_S$  или, с соблюдением “размерности” величин, от локальной магнитуды  $M_L$  KAGSR, связанной с  $K_S$  линейным соотношением [Федотов, 1972]:

$$M_L = 0.5 K_S - 0.75. \quad (17)$$

Как было указано ранее,  $MLH$  непосредственно определяется для небольшого числа землетрясений, однако для этой магнитуды нет нижней границы в каталоге; кроме того, до 2004 г. область пересечения каталогов соседних филиалов была больше за счет того, что каталог Сахалинского филиала включал Северные Курилы. С 1981 по 2022 г. найдено 219 пар значений этих двух магнитуд в диапазонах  $M_L = 3.9\text{--}6.6$  и  $MLH = 3.1\text{--}6.7$  (см. рис. 7а). Для сравнения на рис. 7 приведена зависимость  $M_S(BB)$  ЕССН от  $K_S$ , рассчитанная для территории Камчатки [Федотов, 1972],

$$M_S(BB) = 4.65 + 1.49 K_S, \quad (18)$$

и пересчитанная в зависимость  $M_S(BB)$  от  $M_L$  по формуле (17). Как видно из рис. 7а, использование этой зависимости для современного курильского каталога даст заметное (на 0.2 м.е.) завышение значений  $MLH$ .

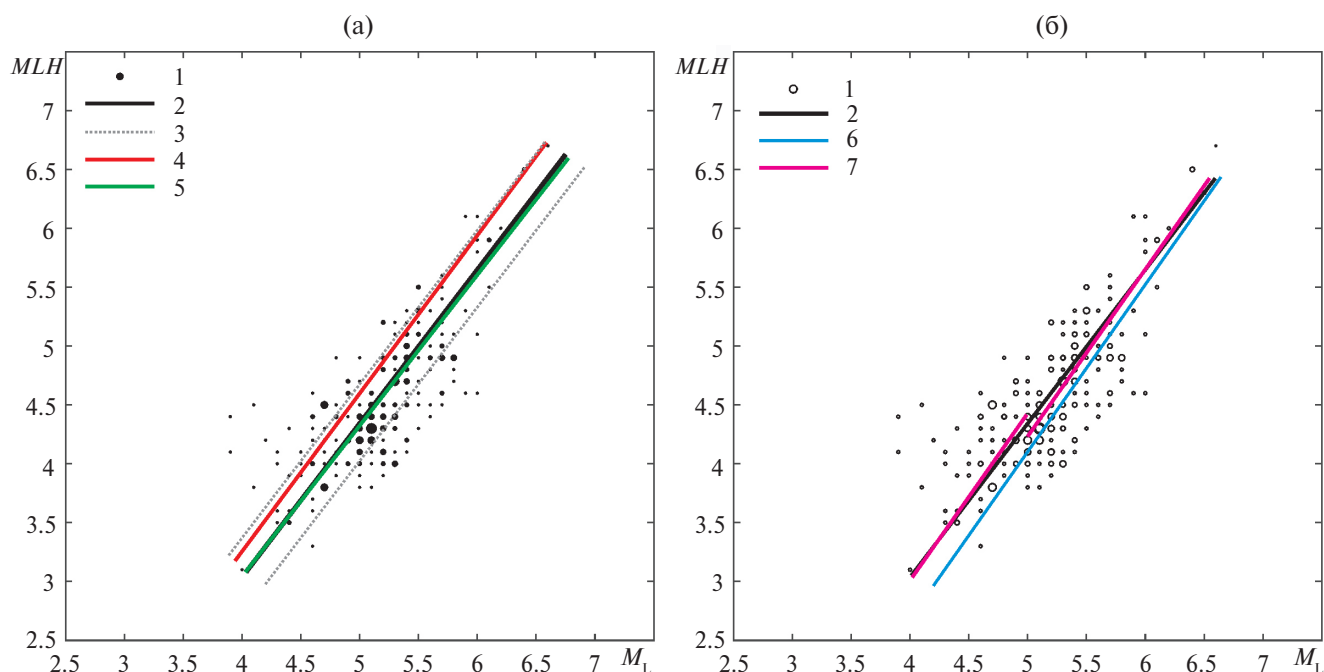
Проверим полученное соотношение транзитным пересчетом с использованием ранее полученных соотношений. Воспользуемся зависимостью  $MLH(K_C)$  из работы [Сафонов, 2024],

$$MLH = 0.63 K_C - 2.37, \quad (19)$$

и полученной выше зависимостью  $K_C(K_S)$  (16). Последовательный пересчет  $M_L \rightarrow K_S \rightarrow K_C \rightarrow MLH$  позволяет получить зависимость (см. рис. 7а, зеленая линия), практически совпадающую с ранее найденной непосредственным сравнением данных каталогов.

Теперь получим соотношение для перехода от  $MLH$  к  $M_L$  с использованием в качестве прокси моментной магнитуды. Зависимость между  $M_L$  и региональной  $M_W$  приводится в работе [Абубакиров и др., 2018]:





**Рис. 7.** Зависимость  $MLH$  Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН от  $M_L$  Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. а – линейная зависимость  $MLH(M_L)$ : 1 – положение пар значений магнитуд; 2 – регрессионная прямая  $MLH(M_L)$ , полученная методом OSR; 3 – интервал стандартной ошибки регрессии  $Se$ ; 4 – вариант зависимости из работы [Федотов, 1972]; 5 – пересчет через энергетический класс. б – пересчет зависимости  $MLH(M_L)$  через  $M_W$ : 6 – без поправки к  $M_W$ , 7 – с учетом поправки к  $M_W$  из статьи [Абубакиров и др., 2018].

$$M_W = M_L - 0.4. \quad (20)$$

Поскольку большая часть значений выборки (см. рис. 7) лежит в области умеренно-сильных событий, воспользуемся “нижней” частью полученной зависимости  $MLH(M_W)$ . Приравняв друг к другу моментные магнитуды соотношений (11) и (20), получим транзитную зависимость  $MLH(M_L)$ .

Как видно из рис. 7б (голубая линия), непосредственный пересчет  $M_L \rightarrow M_W \rightarrow MLH$  дает существенную недооценку  $MLH$ . Причина в том, что зависимость  $M_W(M_L)$  [Абубакиров и др., 2018] получена не для  $M_W^{GCMT}$ , а для моментной магнитуды, определяемой KAGSR двумя разными методами: 1) при региональной оценке тензора сейсмического момента центроида ( $M_W^{RSMT}$ ); 2) через определение сейсмического момента по спектру для группы S-волн ( $M_W^{CB}$ ). При этом для  $M_L > 5$  взяты соответствующие значения  $M_W^{RSMT}$ , а для  $M_L \leq 5$  – значения  $M_W^{CB}$ . Средняя разность в определении моментной магнитуды в сравнении с  $M_W^{GCMT}$  для этих двух методов составляет соответственно  $\mu = -0.09$  и  $-0.23$  м.е. [Абубакиров и др., 2018]. Учет этой поправки для пересчетной формулы позволяет получить линейную зависимость с разрывом в

значении  $M_L = 5.0$ , заметно лучше совпадающую с вариантом, полученным непосредственной регрессией выборки. Подобное сопоставление с учетом поправок к моментной магнитуде от определяющего агентства показывает принципиальную применимость формулы (11) для транзитных пересчетов.

Другими соседями SAGSR на южном фланге Курильской островной дуги являются Японское метеорологическое агентство (JMA), определяющее параметры землетрясений в широких окрестностях вокруг Японии, а также упоминавшееся выше агентство NIED. Магнитуда каталога JMA –  $M_j$  – строится на комбинировании нескольких магнитудных шкал, для землетрясений на локальных и региональных расстояниях в зависимости от величины события, глубины и эпицентрального расстояния.

Исследования показывают [Edwards, Rietbrock, 2009; Uchide, Imanashi, 2018], что магнитуда  $M_j > 4.0$  для неглубоких землетрясений относительно неплохо соответствует  $M_W^{NIED}$ , недооценивая ее величину примерно на  $\Delta M = 0.2-0.3$  м.е. Для более слабых событий зависимость становится нелинейной. Скорее всего, причина отклонения зависимости та же, что указывалась выше

для  $M_S$ , но несколько более сложная из-за комплексного характера современной шкалы  $M_j$ . В работе [Uchide, Imanashi, 2018] с использованием определений моментной магнитуды слабых ( $M_W = 1.5\text{--}3.0$ ) неглубоких землетрясений получена зависимость  $M_j(M_W)$  в виде полинома второй степени:

$$0.5 \leq M_j \leq 7.0 : M_W^{\text{NIED}} = 0.053(\pm 0.003), \\ M_j^2 + 0.33(\pm 0.02)M_j + 1.68(\pm 0.03). \quad (21)$$

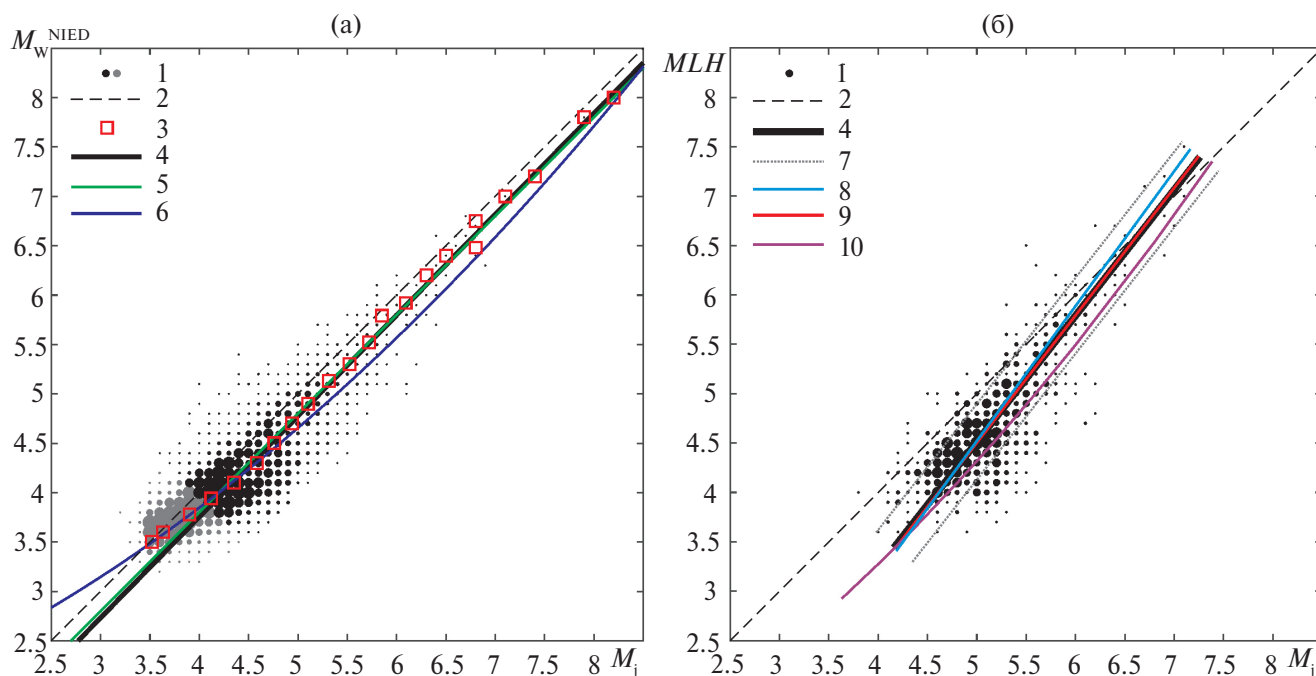
На рис. 8а показаны пары значений  $M_W(M_j)$  землетрясений в пределах Курило-Охотского региона с глубиной очага  $h \leq 80$  км, произошедших в период с 1997 по 2022 г., по данным JMA, NIED [JMA, 2024; NIED, 2024]. Квадратами показаны средние значения, рассчитанные по выборкам, выделенным ортогонально линии 1:1 (путем разделения каталога по параметру  $(M_W + M_j)/2$  на фрагменты в 0.2 м.е.). Как видно из этого рисунка, криволинейная зависимость  $M_W(M_j)$  (синяя линия) хорошо отвечает только нижнему диапазону доступных данных  $M_j < 4.6$ , далее средние значения расположены вблизи

линии  $M_W = M_j - 0.2$  (зеленая линия). В самом деле, если построить линейную зависимость по данным в диапазоне, показанном черными окружностями на рис. 8а, полученная линия (черная) практически совпадает с  $M_W = M_j - 0.2$ . Таким образом, можно при  $M_j \leq 4.2$ ,  $M_W \leq 4.0$  использовать зависимость (21) из работы [Uchide, Imanashi, 2018], а для  $M_j > 4.2$ ,  $M_W > 4.0$  — линейную:

$$M_W^{\text{NIED}} = M_j - 0.2. \quad (22)$$

На основе каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН и JMA получим зависимость  $MLH(M_j)$ . В каталогах за 1999–2022 гг. в пределах Курило-Охотского региона найдено 964 землетрясения, определенных одновременно с помощью  $MLH$  и  $M_j$  (см. рис. 8б) (использовались только значения  $MLH$  по данным как минимум трех сейсмостанций). В предположении, что стандартные ошибки определения  $MLH$  и  $M_j$  близки, методом OSR получена линейная зависимость  $MLH(M_j)$ :

$$MLH = 1.28(\pm 0.06) M_j - 1.86(0.29), \\ Se = 0.235, N = 964. \quad (23)$$



**Рис. 8.** Зависимости  $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$  (а) и  $MLH(M_j)$  (б), полученные методом OSR, а также путем пересчета с помощью других соотношений.

1 — положение пар значений магнитуд (серым цветом отмечены данные, не задействованные в расчете регрессионной зависимости); 2 — линия равных значений магнитуд (1:1); 3 — среднее значение магнитуд на интервалах в 0.2 м.е., отложенных ортогонально линии (1:1); 4 — регрессионная прямая, полученная методом OSR; 5 — зависимость (22) из данной работы; 6 — зависимость  $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$  из статьи [Uchide, Imanashi, 2018]; 7 — интервал стандартной ошибки регрессии  $Se$ ; 8 — пересчет  $MLH(M_j)$  через  $M_W^{\text{GCMT}}$ ; 9 — пересчет  $MLH(M_j)$  через  $M_W^{\text{NIED}}$ ; 10 — пересчет  $MLH(M_j)$  с использованием зависимости  $M_W^{\text{NIED}}(M_j)$  из работы [Uchide, Imanashi, 2018].

По фактическому наличию данных эту зависимость можно использовать в интервалах  $M_j = 4.5-7.0$  и  $MLH = 4.0-7.0$ .

Получим зависимость  $MLH(M_j)$ , используя в качестве прокси моментную магнитуду. Поскольку основные значения магнитуд находятся в указанном выше диапазоне, можно применить “нижнюю” зависимость  $MLH(M_w^{GCMT})$  (11) и линейную зависимость  $M_j(M_w^{NIED})$  (22) с поправкой из (8). Как видно из рис. 8б, пересчетная прямая довольно хорошо совпадает с линией регрессии в диапазоне слабых землетрясений, но расходится с ней приблизительно до  $\Delta M = 0.2$  м.е на верхней границе применимости (11). С учетом разброса данных, значительной ошибки регрессии и большого количества пересчетов такое расхождение можно считать умеренным. Однако можно попробовать другой вариант пересчета, используя зависимость  $MLH(M_w^{NIED})$  (14), полученную непосредственно. В этом случае (см. рис. 8б) пересчетная зависимость практически совпадает с линией регрессии. Также на рис. 8б приведена пересчетная кривая с использованием зависимости (21) [Uchide, Imanashi, 2018]. Как и ожидалось, исходя из положения этой линии на рис. 8а, наблюдается расхождение этой кривой и регрессионной прямой сразу после диапазона самых слабых землетрясений.

Таким образом, удалось продемонстрировать, что зависимость (11) можно использовать при транзитном пересчете магнитуды каталога Курило-Охотского региона СФ ФИЦ ЕГС РАН в энергетические характеристики землетрясений других агентств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена двухсегментная линейная зависимость (11), (12) между магнитудой по поверхностной волне  $MLH$  Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН (агентство SAGSR) и моментной магнитудой  $M_w$  агентства GCMT, дополненной данными NIED, скорректированными по найденному соотношению  $M_w^{NIED}(M_w^{GCMT})$ . Использовались данные каталогов 1968–2022 гг. в диапазонах магнитуд  $MLH = 3.0-8.1$  и  $M_w = 3.7-8.3$ .

Вид зависимости обоснован методикой получения сравниваемых магнитуд, положением средних значений малых диапазонов каталога,

а также опытом получения подобной зависимости другими авторами.

Сопоставление полученной зависимости с аналогичными формулами  $M_s(M_w)$  других авторов, полученными по данным длительных каталогов, показывает, что для наиболее сильных землетрясений ( $MLH \geq 7.0$ ) сохраняется отмечавшееся ранее небольшое превышение  $MLH$  как аналога  $M_s(BB)$  над  $M_s(20)$  на  $\sim 0.1$  м.е. На интервале  $MLH = 4.0-6.2$  магнитуда  $MLH$  каталога СФ ФИЦ ЕГС РАН Курило-Охотского региона имеет региональную специфику определения, приводящую к повышению ее значений на  $\Delta M = 0.2-0.4$  м.е., по сравнению как с магнитудами  $M_s^{ISC}$ ,  $M_s^{NEIC}$  глобальных каталогов, так и с выборкой  $M_s^{MOS}$  для Северной Евразии. Использование полученной зависимости для Курило-Охотского региона лучше отвечает реальным данным и позволяет точнее приводить энергетические характеристики региональных землетрясений SAGSR в соответствие с данными других агентств.

На основе выборок каталогов Сахалинского и Камчатского филиалов ФИЦ ЕГС РАН получены зависимости между энергетическими классами Федотова  $K_s$  и Соловьева  $K_c$ , а также магнитудами  $MLH$  и  $M_L$  в районе Средних и Северных Курильских островов. Для проверки полученных линейных соотношений произведен пересчет зависимости  $MLH(M_j)$  через энергетические классы и через моментную магнитуду  $M_w$ . Полученные пересчетом соотношения с высокой точностью совпали с непосредственно рассчитанными регрессионными зависимостями. Лучший результат для  $M_w$  в качестве прокси-магнитуды удалось достичь после коррекции соотношений с учетом разницы определения этой магнитуды в GCMT и KAGSR.

На основе каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН и JMA получена линейная зависимость  $MLH(M_j)$ . Транзитным пересчетом через  $M_w$  удалось подтвердить расчетное соотношение, однако лучший результат дала не полученная ранее зависимость  $MLH(M_w^{GCMT})$ , даже с учетом коррекции при переходе от  $M_w^{GCMT}$  к  $M_w^{NIED}$ , а непосредственно полученная зависимость  $MLH(M_w^{NIED})$ . Такой результат был ожидаем, поскольку при транзитных пересчетах короткие цепочки чаще всего предпочтительнее длинных. И поскольку непосредственно рассчитанные соотношения

обычно лучше транзитных, полученные зависимости  $MLH(M_L)$  и  $MLH(M_f)$  можно также рекомендовать к использованию в границах Курило-Охотского региона в указанном диапазоне магнитуд.

Таким образом, удалось продемонстрировать, что полученная зависимость  $MLH(M_w)$  при использовании в транзитном пересчете энергетических характеристик землетрясений по данным разных агентств позволяет получить достаточно точные результаты, сопоставимые с непосредственно полученными переходными формулами, меньше стандартной ошибки определения сравниваемых магнитуд. Вместе с предложенными ранее переходными соотношениями между магнитудой  $MLH$  и другими энергетическими характеристиками каталога Курило-Охотского региона полученная зависимость  $MLH(M_w)$ , доступная для всего диапазона магнитуд каталога, позволяет привести величину региональных землетрясений в соответствие с величинами других каталогов с учетом региональных особенностей ее определения.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность рецензентам статьи за ценные комментарии и предложения, а также глубокую признательность Е.П. Семенову, Н.В. Петровой и Л.Н. Зарочинцевой за любезно предоставленные данные.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного финансирования ИМГиГ ДВО РАН (№ ГР 124013000764-8) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М., Скоркина А.А. Массовое определение моментных

магнитуд  $M_w$  и установление связи между  $M_w$  и  $M_L$  для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 37–51.

Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Ред. З.И. Аранович, Д.П. Кирнос, В.М. Фремд. М.: Наука, 1974. 244 с.

Ванек И., Затопек А., Карник В., Кондорская Н.В., Ризниченко Ю.В., Саваренский Е.Ф., Соловьев С.Л., Шебакин Н.В. Стандартная шкала магнитуд // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 2. С. 153–158.

Габсатарова И.П., Пойгина С.Г. Унификация сейсмологических каталогов по магнитуде // Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: СФ ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 145–148.

Горбунова И.В., Захарова А.И., Чепкунас Л.С. Магнитуды  $M_{LV}$  и  $M_{LN}$  // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 2. С. 87–93.

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

Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР / Отв. сост. Н.В. Кондорская, З.И. Аранович, Н.В. Шебакин. М.: Наука, 1982. 273 с.

Маловичко А.А., Петрова Н.В., Габсатарова И.П., Левина В.И., Михайлова Р.С., Курова А.Д. Сейсмичность Северной Евразии в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2023. Вып. 26 (2018–2019 гг.). С. 10–38.

<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>

Сафонов Д.А. Переходные соотношения для энергетических характеристик землетрясений Курило-Охотского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2024. Т. 51. № 2. С. 102–117.

<https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-6>

Сафонов Д.А., Коновалов А.В. Использование программы ISOLA для определения тензора сейсмического момента землетрясений Курило-Охотского и Сахалинского регионов // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 3. С. 102–112.

Сейсмологический каталог (сеть телесеизмических станций) / ФИЦ ЕГС РАН, [http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic\\_Catalog/](http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_Catalog/) (дата обращения 05.08.2024).

Соловьев С.Л. Классификации землетрясений по величине их энергии // Тр. Геофиз. института АН СССР. 1955. № 30(157). С. 3–21.

Соловьев С.Л. О региональных отличиях калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясений по поверхностным волнам // Магнитуда и



- энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 2. С. 55–59.
- Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой Курильских землетрясений // *Физика Земли*. 1967. № 2. С. 13–23.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В. Сейсмичность Приамурья и Приморья, Сахалина и Курило-Охотского региона в 2018–2019 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. 2023. Вып. 26 (2018–2019 гг.). С. 154–170.  
<https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.01>
- Фокина Т.А., Костылев Д.В., Коргун Н.В., Сафонов Д.А. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Приамурье и Приморье, Сахалин и Курило-Охотский регион // *Землетрясения России в 2022 году*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2024. С. 59–67.
- Халтурин В.И. Соотношения между магнитудными определениями, ожидаемые и наблюдаемые. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 1. С. 145–153.
- Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда  $M_S(20R)$  для Дальнего Востока России // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46. № 3. С. 58–63.
- Чубарова О.С., Гусев А.А. Региональная шкала магнитуд по поверхностным волнам для землетрясений Дальнего Востока России // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 60–71.  
<https://doi.org/10.7868/S0002333716060028>
- Bondár I., Storchak D.A. Improved location procedures at the International Seismological Centre // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 186. P. 1220–1244.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x>
- Bormann P., Wendt S., Di Giacomo D. Seismic sources and source parameters // *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)* / Ed. P. Bormann. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2013. P. 1–259.  
[https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_ch3](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3)
- Bormann P., Wylegalla K. Investigation of the correlation relationships between various kinds of magnitude determination at station Moxa depending on the type of instrument and on the source area // *Public. Inst. Geophys. Polish Acad. Sci.* 1975. V. 93. P. 160–175 (in German).
- Chebrov V.N., Droznin D.V., Kugaenko Y.A., Levina V.I., Senyukov S.L., Sergeev V.A., Shevchenko Y.V., Yashchuk V.V. The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *J. Volcanology and Seismology*. 2013. V. 7. № 1. P. 16–36.  
<https://doi.org/10.1134/S0742046313010028>
- Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions // *Geophysical Research*. 2020. V. 21. № 3. P. 66–91.
- Cheng J., Rong Y., Magistrale H., Chen G., Xu X. An  $M_w$ -based historical earthquake catalog for Mainland China // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2017. V. 107. № 5. P. 2490–2500.  
<https://doi.org/10.1785/0120170102>
- Das R., Wason H.R., Sharma M.L. Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude // *Nat. Hazards*. 2011. V. 59. P. 801–810.
- Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J. ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed  $M_S$  and  $m_b$ , proxy  $M_w$ , final magnitude composition and completeness assessment // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 239. P. 33–47.  
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.005>
- Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A. The ISC-GEM earthquake catalogue (1904–2014): status after the extension project // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. P. 1877–1899.  
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
- Edwards B., Rietbrock A. A comparative study on attenuation and source-scaling relations in the Kantō, Tokai, and Chubu regions of Japan, using data from Hi-net and KiK-net // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. V. 99. P. 2435–2460.  
<https://doi.org/10.1785/0120080292>
- Ekström G., Dziewonski A.M. Evidence of bias in estimations of earthquake size // *Nature*. 1988. V. 332. P. 319–323.
- [GCMT] The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project, [www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org) (Access date: August 12, 2024).
- Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1945. V. 35. P. 3–12.
- Hall J. Linear Deming Regression // *MATLAB Central File Exchange*, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33484-linear-deming-regression> (Access date: August 5, 2024).
- Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84(B5). P. 2348–2350.
- [ISC] International Seismological Centre. On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- [JMA] Japan Meteorological Agency, <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html> (Access date: August 12, 2024).

- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82(20). P. 2981–2987.
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // *Tectonophysics*. 1983. V. 93. P. 185–199.
- Karnik V.* Seismicity of Europe and the Mediterranean. Czech Republic: Geophysical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, 1996. 28 p.
- Kubo A., Fukuyama E., Kawai H., Nonomura K.I.* NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application // *Tectonophysics*. 2002. V. 356. № 1–3. P. 23–48.
- Lolli B., Gasperini P., Vannucci G.* Empirical conversion between teleseismic magnitudes ( $m_b$  and  $M_s$ ) and moment magnitude ( $M_w$ ) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale // *Geophysical Journal International*. 2014. V. 199. № 2. P. 805–828.  
<https://doi.org/10.1093/gji/ggu264>
- [NEIC] National Earthquake Information Center (NEIC) / USGS. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic> (Access date: August 5, 2024).
- [NIED] F-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. <http://www.fnet.bosai.go.jp> (Access date: July 21, 2024).
- Petrova N.V., Gabsatarova I.P.* Depth corrections to surface-wave magnitudes for intermediate and deep earthquakes in the regions of North Eurasia // *J. of Seismology*. 2020. V. 24. № 1. P. 203–219.
- Scordilis E.M.* Empirical Global Relations Converting  $M_s$  and  $mb$  to Moment Magnitude // *J. of Seismology*. 2006. V. 10. P. 225–236.  
<https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Uchide T., Imanishi K.* Underestimation of microearthquake size by the magnitude scale of the Japan Meteorological Agency: Influence on earthquake statistics // *J. of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. V. 123. P. 606–620.  
<https://doi.org/10.1002/2017JB014697>
- Wason H.R., Das R., Sharma M.L.* Regression relations for magnitude conversion for the Indian region // *Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology: Contributions in Honour of Jai Krishna*. Cham: Springer, 2018. P. 55–66.

## THE RELATIONSHIP BETWEEN MAGNITUDES $MLH$ AND $M_w$ FOR THE KURIL-OKHOTSK REGION AND ITS USE FOR TRANSIT CONVERSIONS TO OTHER MAGNITUDES

**D. A. Safonov**

*Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS,  
Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia  
e-mail: d.safonov@imgg.ru*

In order to unify the earthquake catalogue of the Kuril-Okhotsk region, the two-segment linear relationship was obtained between the surface wave magnitude  $MLH$  of the Sakhalin branch of the GS RAS and the moment magnitude  $M_w$  of the GCMT and NIED agencies. Comparison with similar formulas based on different catalogs shows that for strong  $MLH = 6.5–8.1$  earthquakes, there is a slight  $\sim 0.1$  excess of the regional magnitude of  $MLH$  over the  $M_s$ . In the interval  $MLH = 4.0–6.5$ , the regional magnitude  $MLH$  exceeds  $M_s$  values by 0.2–0.4. The relationships between  $MLH$  and  $M_L$  of the Kamchatka branch of the GS RAS in the region of the middle-northern Kuril Islands,  $MLH$  and  $M_j$  of the JMA agency for the southern part of the region were obtained. By transit recalculation using the relation  $MLH(M_w)$ , it was possible to repeat the directly obtained dependences with good accuracy. The best result is achieved by taking into account the differences in  $M_w$  obtained by different agencies.

**Keywords:** earthquake, magnitude scales, regression relationships, Kuril-Okhotsk region