
НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 550.34.01

DOI: 10.7868/S3034530825050088

Калибровка и апробация новой магнитудной шкалы на примере сильного корового землетрясения 01.01.2024 в Японии ($M_w = 7,5$)

А.В. Коновалов, И.Д. Орлин, Ю.А. Степнова✉

Алексей Валерьевич Коновалов

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

a.konovalev@geophystech.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2997-1524>

Илья Дмитриевич Орлин

инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

office@geophystech.ru

Юлия Андреевна Степнова

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

stepnova@fegi.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5263-5161>

Аннотация. На примере корового землетрясения в Японии ($M_w = 7,5$, 01.01.2024) и его афтершоков проведены измерения и анализ параметров сильных движений грунта, в том числе интенсивности по Ариасу. Интенсивность Ариаса является одной из главных физических метрик, используемых в инженерной сейсмологии. Уровень интенсивности Ариаса непосредственно связан со сброшенным напряжением в очаге землетрясения, поэтому разработка и калибровка магнитудной шкалы, учитывающей не только размеры разрыва, но и сброшенное напряжение в очаге землетрясения, является актуальной задачей сейсмологических наблюдений. В настоящей работе апробирована новая магнитудная шкала (M_{Ia3}), основанная на модифицированной интенсивности Ариаса. Калибровка шкалы выполнена по средним и умеренным землетрясениям в целевом регионе ($M \sim 5$). Высокую эффективность предложенной шкалы подтверждают оценки магнитуды, полученные по новой методике, которые близки к моментной магнитуде (M_w).

Ключевые слова: магнитуда, землетрясение, сброшенное напряжение, интенсивность по Ариасу, тектоника

Для цитирования: Коновалов А.В., Орлин И.Д., Степнова Ю.А. Калибровка и апробация новой магнитудной шкалы на примере сильного корового землетрясения 01.01.2024 в Японии ($M_w = 7,5$) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 104–115. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050088>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Calibration and testing of a new magnitude scale: the case study of a strong crustal earthquake on 01.01.2024 in Japan ($M_w = 7,5$)

A.V. Konovalov, I.D. Orlin, Yu.A. Stepnova

Alexey V. Konovalov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
a.konovalov@geophytech.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2997-1524>

Ilya D. Orlin

Engineer
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
office@geophytech.ru

Yulia A. Stepnova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
stepnova@fegi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5263-5161>

Abstract. A crustal earthquake and its aftershocks that occurred in Japan ($M_w = 7,5$, 01.01.2024) were studied to make measurements and analyze the parameters of strong ground motion, including the Arias intensity. The latter is one of the key physical parameters used in engineering seismology. The level of the Arias intensity is directly connected with the stress drop in an earthquake source. Therefore, developing and calibrating a magnitude scale that would take into account not only fault dimensions, but also the stress drop in an earthquake source is a vital task of seismological observations. In this paper we present our test results of a new magnitude scale (M_{Ia3}) based on a modified Arias intensity. The scale was calibrated to medium and moderate earthquakes in the target area ($M \sim 5$). The high efficiency of the proposed scale is evidenced by the magnitudes, determined through the new method, that are almost consistent with the moment magnitude (M_w).

Keywords: magnitude, earthquake, stress drop, Arias intensity, tectonics

For citation: Konovalov A.V., Orlin I.D., Stepnova Yu.A. Calibration and testing of a new magnitude scale: the case study of a strong crustal earthquake on 01.01.2024 in Japan ($M_w = 7,5$). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):104-115. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050088>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Определение магнитуды землетрясения является актуальной задачей в наши дни. Для ее решения сейсмологи разрабатывают новые или модифицируют существующие магнитудные шкалы. Разные шкалы магнитуд, как правило, отражают различные аспекты очагового процесса.

Так, при разработке моделей затухания сильных движений грунта важным фактором является выбор типа магнитудной шкалы. Обычно в количественных оценках сейсмической опасности и риска используется шкала моментной магнитуды [1], принятая в качестве эталонной. При этом считается, что моментная магнитуда отражает размер очага.

Как показывают последние исследования, амплитудный уровень сейсмических колебаний достаточно тесно коррелирует с характеристикой сброшенного напряжения в очаге землетрясения [2–5]. По этому поводу были высказаны идеи об использовании в оценках сейсмической опасности одновременно двух типов магнитуд: моментной и энергетической [4].

Моментная магнитуда оценивается по амплитудам сейсмических колебаний в низкочастотной области (см., например, [6]). Энергетическая магнитуда определяется преимущественно высокочастотным спектром [3, 7] и, как уже сказано, отождествляется со сброшенным напряжением в очаге землетрясения. В связи с этим разработка и калибровка магнитудной шкалы, учитывающей не только размеры, но и сброшенное напряжение в очаге землетрясения, является важной задачей инженерной сейсмологии.

В работе [8] предложена и физически обоснована новая магнитуда по измерениям интенсивности Ариаса в приочаговой зоне землетрясения. Как отмечено в упомянутой работе, инженерная метрика движений грунта (интенсивность Ариаса) отражает физические характеристики очага, в том числе сброшенное напряжение.

В настоящей работе для тестирования новой магнитудной шкалы, основанной на интенсивности Ариаса, рассматривается достаточно сильное землетрясение, произошедшее 1 января 2024 г. в Японии, магнитуда которого, по версии Японского метеорологического агентства (JMA), составила 7,6, а моментная магнитуда $M_w = 7,5$.

Метод исследования

В работе [8] показано, что в приближении точечного источника квадрат высокочастотной полочки спектра ускорений пропорционален интенсивности Ариаса с учетом функций, описывающих затухание и геометрическое расхождение сейсмических волн на всей трассе их распространения. Для калибровки спектральной магнитуды предлагается использовать модифицированную метрику интенсивности Ариаса ($Ia3$):

$$Ia3 = \frac{\pi}{2g} \int_0^T [a_{HP3}(t)]^2 dt, \quad (1)$$

где $a_{HP3}(t)$ – запись ускорения после применения высокочастотного фильтра Баттерворта 2-го порядка с граничной частотой 3 Гц; T – длина записи; модифицированная интенсивность по Ариасу рассчитывается на горизонтальных каналах, результаты суммируются.

В качестве примера на рис. 1 показаны записи землетрясения и результаты вычисления параметра $Ia3$ как функции от временного окна обработки. Как видно из рис. 1, временное окно, в пределах которого содержится 95% от общей энергии сигнала, составляет около 20–30 с для землетрясения с магнитудой $M_w = 7,5$. За пределами этого окна метрика $Ia3$ резко замедляет свой рост. Приведенные оценки характеризуют продолжительность высокочастотных колебаний рассматриваемого землетрясения.

Аналитическое представление уравнения затухания интенсивности $Ia3$ в рамках модели очага с фрагментарными неровностями, являющимися источниками высокочастотного некогерентного излучения [8], имеет вид

$$\lg Ia3 = M_w - 2\zeta \lg r - br - f_{kappa} - c, \quad (2)$$

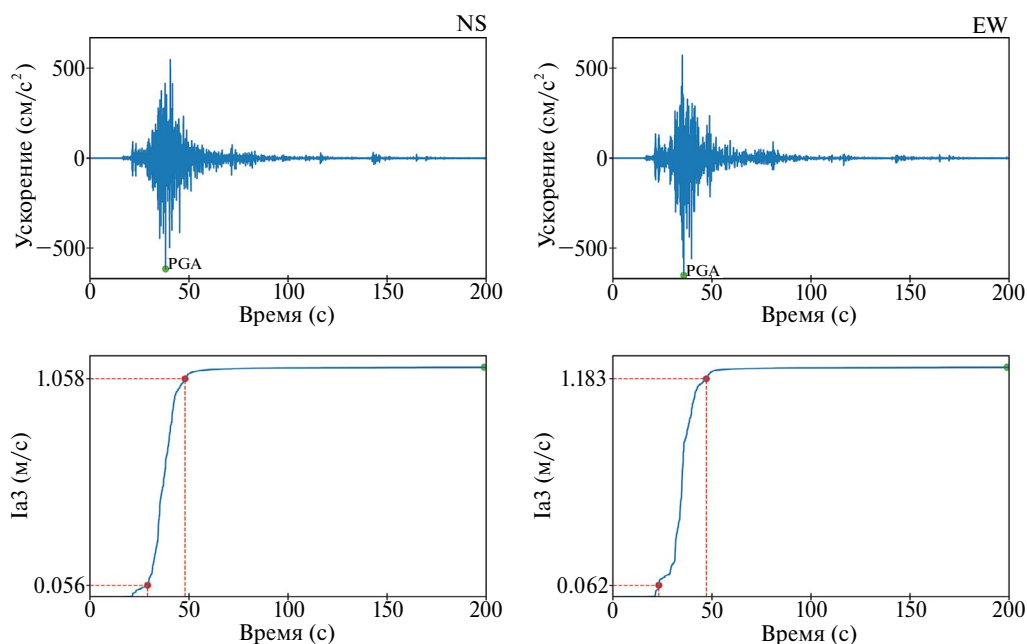


Рис. 1. Примеры акселерограмм и соответствующих им временных историй $Ia3$ землетрясения 01.01.2024 г. ($M_w = 7,5$) в Японии. Станция – ISK015, эпицентральное расстояние составляет 39,8 км. На верхних графиках кружками обозначены амплитудные измерения пикового ускорения грунта (PGA), на нижних – пунктирными линиями отмечены амплитудные измерения и временные отметки, соответствующие 5 и 95% длительности сигнала

где $Ia3$ – модифицированная интенсивность Ариаса, M_w – моментная магнитуда землетрясения, ζ – показатель геометрического расхождения фронта S -волны, r – гипоцентральное расстояние, b – характеристика неупругого затухания на всей трассе распространения S -волны, определяемая средним декрементом затухания в полосе частот 3–10 Гц; f_{kappa} – характеристика «станционного» затухания S -волны, c – коэффициент, определяемый материальными параметрами в области очага и пункта измерения, а также сброшенным напряжением на неоднородностях (asperity ($\Delta\tau$)).

Функция f_{kappa} задается следующим выражением:

$$f_{kappa} = \lg(2\kappa \exp(2\pi\kappa f_H)), \quad (3)$$

где κ – коэффициент «станционного» затухания S -волны.

Параметр c определяется формулой

$$c = \lg \left\{ \left(\frac{16}{7} \right)^{2/3} \frac{g\rho^2\beta^2 R_0^2}{\pi F^2 \overline{Am}^2 k_f^{1/3} \Delta\tau^{4/3}} \right\} - \frac{18,2}{3}. \quad (4)$$

Расшифровка и значения физических констант приведены в таблице. Константы используются для оценки сброшенного напряжения ($\Delta\tau$) согласно (4).

Процесс калибровки новой магнитуды, которая названа M_{Ia3} , заключается в подборе коэффициентов модели затухания (в приближении точечного источника) для заданного региона с использованием моментной магнитуды в качестве входного параметра. Неизвестными параметрами являются: 1) коэффициент геометрического расхождения – ζ ; 2) харак-

Таблица

Физические характеристики, используемые в оценках сброшенного напряжения

Параметр	Значение	Расшифровка
g	9,81 м/с ²	Ускорение свободного падения
ρ	2700 кг/м ³	Плотность среды в области очага землетрясения
β	3300 м/с	Скорость S -волны в области очага землетрясения
R_0	1000 м	Опорное расстояние
F	2 отн. ед.	Коэффициент, учитывающий отражение S -волны от свободной поверхности
k_f	0,2 отн. ед.	Коэффициент заполнения неровностей
$\overline{Am}$	2 отн. ед.	Различие в импедансах в очаге и под станцией в полосе частот 3–10 Гц

теристика неупругого затухания – b ; 3) свободный коэффициент – c . Найденные коэффициенты являются калибровочными.

К неизвестным параметрам также следует отнести коэффициент затухания в верхней части среды (κ), который целесообразно оценивать исходя из спектральной подгонки. В работе [9] по большому количеству данных японской сейсмологической сети KiK-net получена экспериментальная зависимость, согласно которой κ монотонно убывает с ростом V_{S30} в диапазоне $155 < V_{S30} < 2000$ м/с. Поэтому для параметризации «каппа-эффекта» при калибровке и оценках магнитуды используются данные о V_{S30} вместе с упомянутыми эмпирическими зависимостями. Формула для оценки «каппа-параметра» согласно работе [9] имеет следующий вид:

$$\ln \kappa_0 = \left\{ \begin{array}{l} -0,18 (\ln 155)^2 + 1,816 \ln 155 - 7,38, 100 \text{ м/с} < V_{S30} < 155 \text{ м/с} \\ -0,18 (\ln V_{S30})^2 + 1,816 \ln V_{S30} - 7,38, 155 \text{ м/с} < V_{S30} < 2000 \text{ м/с} \\ -0,18(\ln 2000)^2 + 1,816 \ln 2000 - 7,38, 2000 \text{ м/с} < V_{S30} < 3000 \text{ м/с} \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Неизвестные коэффициенты модели (2) находятся обычной регрессией. Помимо среднеквадратичного отклонения (σ) оценивался коэффициент детерминации (R^2). После того как все неизвестные коэффициенты для целевого региона определены, оценка магнитуды производится следующим образом:

$$M\text{Ia}3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \lg \text{Ia}3_i + 2\zeta \lg r + br_i + c + f_{\text{каппа}} \left(V_{S30,i} \right) \right\}, \quad (6)$$

где индекс i относится к пункту измерения, N – количество доступных записей для заданного землетрясения, $V_{S30,i}$ – *станционная скорость* в i -м пункте.

Район исследований

Исследуемое землетрясение произошло 1 января 2024 г. в 07:10:09 (UTC) вблизи северной оконечности п-ова Ното (о-в Хонсю, Япония). Согласно данным Геологической службы США (USGS), моментная магнитуда землетрясения составила $M_w = 7,5$, магнитуда по объемным волнам – $m_b = 6,9$, магнитуда по поверхностным волнам – $M_{s20} = 7,2$ [10].

Японское сейсмологическое агентство (F-Net) [11] приводит следующие параметры магнитуд: $M_w = 7,5$, $M_j = 7,6$.

Землетрясение произошло в пределах разлома взбросового типа Суцу-Оки/Suzu-oki (ранее известного как Нороши-Оки/Noroshi-oki) [12], относящегося к системе активных разломов западного побережья Японии. Разлом простирается с северо-востока на юго-запад, с падением на юго-восток, угол падения составляет 60° . Правосторонние сдвиговые перемещения определяют кинематику разломной зоны [13]. Параметры разрыва, согласно модели конечного разлома [14], составили: угол падения – 35° , угол простирания – 51° . Очаг землетрясения характеризуется близгоризонтальным напряжением сжатия. Тип подвижки – взброс с осью сжатия СЗ–ЮВ-направления.

В целом район п-ова Ното характеризуется крайне неоднородной структурой земной коры [15], в основном состоит из неогеновых вулканокластических и осадочных пород, перекрывающих палеозойские и мезозойские породы фундамента. Данный участок (север п-ова Ното) проявляет сейсмическую активность с ноября 2020 г., включая роевые события. В прибрежной зоне со стороны северного побережья п-ова Ното выделяется активная зона разломов, состоящая из четырех сегментов, расположенных с востока на запад соответственно: Суцу-Оки/Suzu-oki (длиной 21 км), Вадзима-Оки/Wajima-oki (21 км), Саруяма-Оки/Saryuama-oki (32 км) и Мондзен-Оки/Monzen-oki (23 км), которые тектонически взаимосвязаны и действуют как единый разлом, движущийся по принципу цепной реакции (рис. 2).

Исходные данные

В расчетах использовались сейсмические записи открытой японской базы данных Strong-motion Seismograph Kyoshin/Kiban Kyoshin Networks, состоящей из двух подсетей, K-NET и KiK-net. Сеть сейсмографов, объединенная в одну систему, насчитывает более тысячи станций в наземном и скважинном исполнениях. Данные доступны на сайте [17] после регистрации и аутентификации.

Исходные данные условно разделены на две выборки – калибровочную и валидационную. К калибровочной выборке относятся записи землетрясений с магнитудой M_w от 4,6 до 5,3

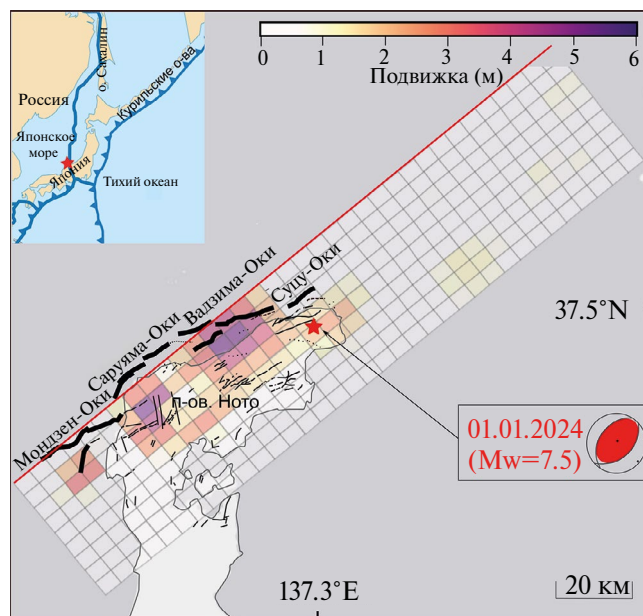


Рис. 2. Фрагмент поверхностной проекции сегментов разрыва с данными о распределении финальной подвижки на плоскости разрыва 1 января 2024 г. в 07:10:09 (UTC) согласно решению USGS [16]. Жирными линиями выделены разломы, которые ассоциируются с главным событием

(афтершоки землетрясения 01.01.2024 г.), по которым оценивались физические характеристики очага и среды. На рис. 3 графически проиллюстрирован результат статистической подгонки с помощью нормализации к магнитуде $M_w = 5$ в соответствии с моделью (2). В калибровочную выборку вошли записи 14 событий.

Около 40 афтершоков с магнитудой M_w от 3,5 до 5,9, а также главное событие с $M_w = 7,5$ составили основу валидационной выборки.

В объединенном наборе данных, включающем калибровочную и валидационную выборки, моментная магнитуда (M_w) варьируется от 3,5 до 7,5, «станционная» скорость S -волн (V_{S30}) – от 643 до 1134 м/с. Гипоцентральное расстояние варьируется от 10 до 400 км. В общей сложности обработано около 1500 сейсмических записей. Количество используемых сейсмических станций составило чуть более 200 пунктов.

В японской базе данных для каждого пункта наблюдений приводится развернутый скоростной разрез. В этом случае для оценки средней скорости S -волны в верхнем 30-метровом грунтовом слое (V_{S30}) привлекалось выражение

$$V_{S30} = \frac{z}{\sum_i \frac{z_i}{v_i}}, \quad (7)$$

где z_i – мощность i -го слоя, v_i – скорость поперечных волн в i -м слое, z – общая мощность, равная 30 м.

Результаты исследований

Приведем коэффициенты модели затухания для метрики $Ia3$ (в угловых скобках – среднее по калибровочной выборке данных):

Коэффициент (параметр)	Значение
ζ	$1,0931 \pm 0,1573$
b	$0,0062 \pm 0,0012$
c	$4,3186 \pm 0,5116$
σ	0,665
R^2	0,617

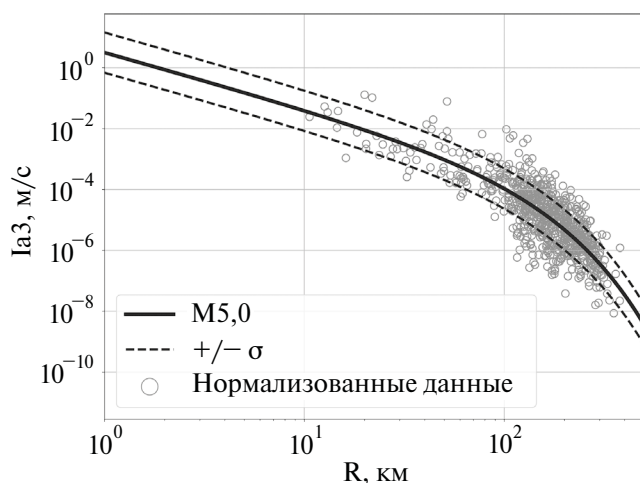


Рис. 3. Нормализованные данные из калибровочной выборки и соответствующая им эмпирическая кривая затухания для $Ia3$

$\langle V_{S30} \rangle$, м/с	787
$\langle \kappa \rangle$, 1/с	0,038
$\langle \Delta \tau \rangle$, МПа	8,86

Они же являются калибровочными для соответствующей магнитуды. Значение среднего сброшенного напряжения оценено по калибровочной выборке данных согласно формуле (4). Величина сбрасываемого напряжения составила 8,86 МПа. Данная характеристика отождествляется с субисточниками высокочастотного некогерентного излучения – «прочными» пятнами на разрыве [18].

Результаты расчета магнитуды M_{Ia3} и ее сопоставления с M_w представлены на рис. 4. На данном рисунке показаны пары M_w – M_{Ia3} . На рис. 5 показана разность магнитуд M_{Ia3} и M_w в зависимости от моментной магнитуды, которая показывает вариации «нулевой» линии в зависимости от эталонной (моментной) магнитуды. Несмотря на статистический разброс, обе магнитуды в среднем близки друг к другу, а найденные различия можно интерпретировать стохастической изменчивостью сброшенного напряжения от события к событию.

На рис. 6 показана еще одна магнитудная зависимость. На данном графике сравниваются предложенная магнитуда (M_{Ia3}) и магнитуда Японского метеорологического агентства (M_j). В данном случае M_j оказалась систематически завышена относительно M_{Ia3} на 0,2–0,3 магнитудных единицы для умеренных землетрясений. Для сильнейшего (главного) события M_{Ia3} оказалась несколько выше M_j .

В обоих случаях наблюдается достаточно близкое соответствие магнитудных оценок по шкалам M_w/M_j и M_{Ia3} . Пары M_w – M_{Ia3} практически не выходят за пределы $\pm 0,5$ относительно линии $M_w = M_{Ia3}$. Это означает, что предложенная шкала является эффективной для определения магнитуды землетрясения в диапазоне от $M_w = 3,5$ до $M_w = 5,9$. Также достаточно точно была оценена и магнитуда более крупного события ($M_{Ia3} = 7,9$), здесь значение находится в разумных пределах относительно моментной магнитуды ($M_w = 7,5$), следовательно, возможна корректная оценка магнитуды и других крупных событий согласно предложенной методике.

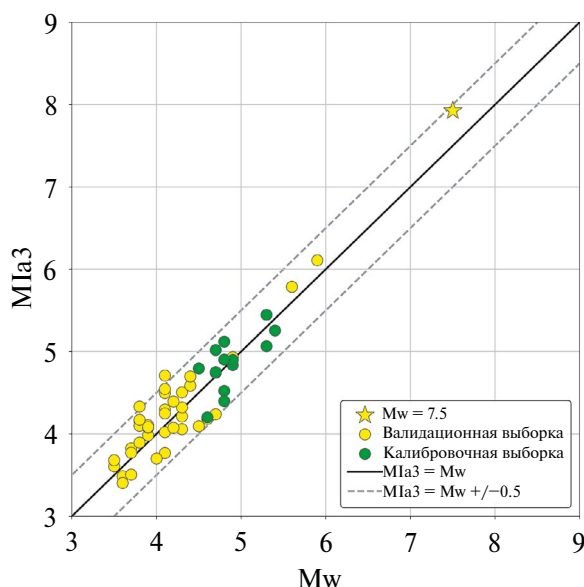


Рис. 4. Сопоставление магнитуд M_w и M_{Ia3}

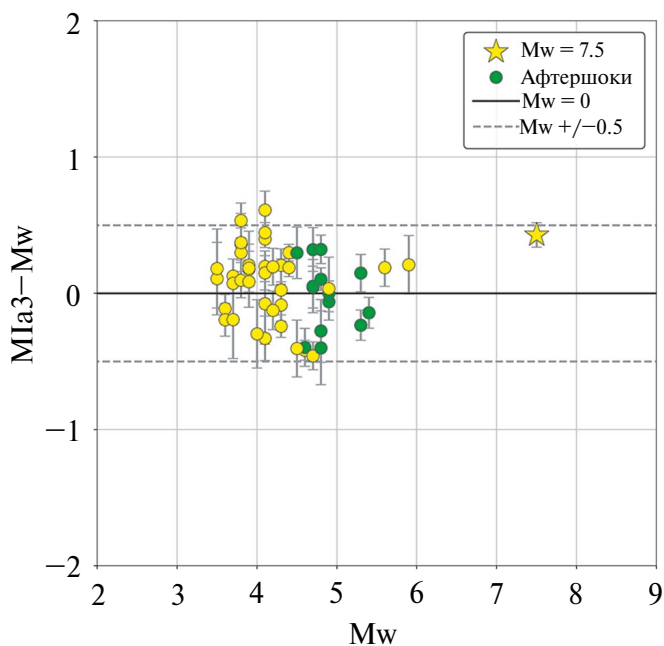


Рис. 5. Разность магнитуд M_{la3} и M_w в зависимости от M_w . Светлые кружки относятся к валидационной выборке, темные – к калибровочной

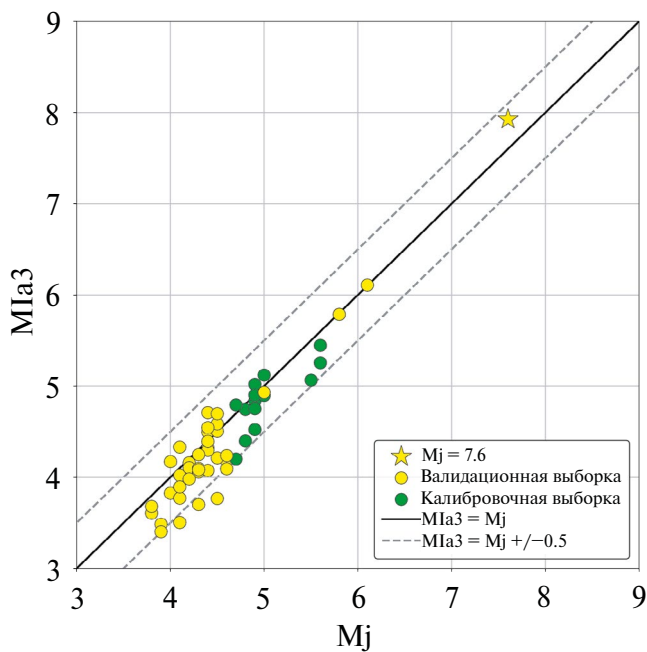


Рис. 6. Сопоставление магнитуд M_{la3} и M_j

Результаты тестирования новой магнитудной шкалы по записям главного события ($M_w = 7,5$) показаны на рис. 7. В диапазоне гипоцентральных расстояний 10–100 км доступно всего несколько записей. В этом случае магнитуда M_{Ia3} незначительно превышает 8. В диапазоне расстояний 100–300 км значение магнитуды стабилизируется на уровне $M_{Ia3} = 7,9$, и при добавлении новых измерений средняя оценка не подвержена вариациям. При пролонгации расстояний до 400 км средняя магнитуда принимает стабильное значение $M_{Ia3} = 7,94 \pm 0,122$.

В целом тестирование можно признать успешным. Как и предсказывает теория, высокочастотный спектральный уровень, воспроизводимый с помощью интенсивности Ариаса, следует степенному закону относительно моментной магнитуды [19], а значит, оценка магнитуды крупных землетрясений согласно предложенной методике не будет подвержена систематическим смещениям. Наблюдаемые отклонения M_{Ia} от M_w обусловлены, наиболее вероятно, очаговыми процессами, генерирующими высокочастотное излучение.

Предложенная магнитуда, по-видимому, выглядит перспективной и требует дальнейшей апробации в других сейсмоактивных районах и для разных типов землетрясений.

Заключение

Апробирована новая энергетическая магнитудная шкала (M_{Ia3}) по измерениям параметров сильных движений грунта в диапазоне расстояний 10–400 км. В качестве амплитудной метрики используется модифицированная интенсивность Ариаса. Магнитуда калибруется по средним и умеренным землетрясениям в целевом регионе ($M \sim 5$).

Эффективность определения магнитуды землетрясения по предложенной методике показана на примере записей крупного землетрясения в Японии ($M_w = 7,5$, 01.01.2024 г.) и его афтершоков. Результаты исследований показали, что определяемая по новой методике магнитуда близка к значениям моментной магнитуды.

С учетом относительно небольшой продолжительности высокочастотных колебаний сильных землетрясений и с используемым диапазоном гипоцентральных расстояний время на оценку магнитуды не превышает три минуты. Поэтому новая магнитудная шкала имеет высокий потенциал практического применения в системах раннего предупреждения, а также для прогноза цунамигенности подводного землетрясения.

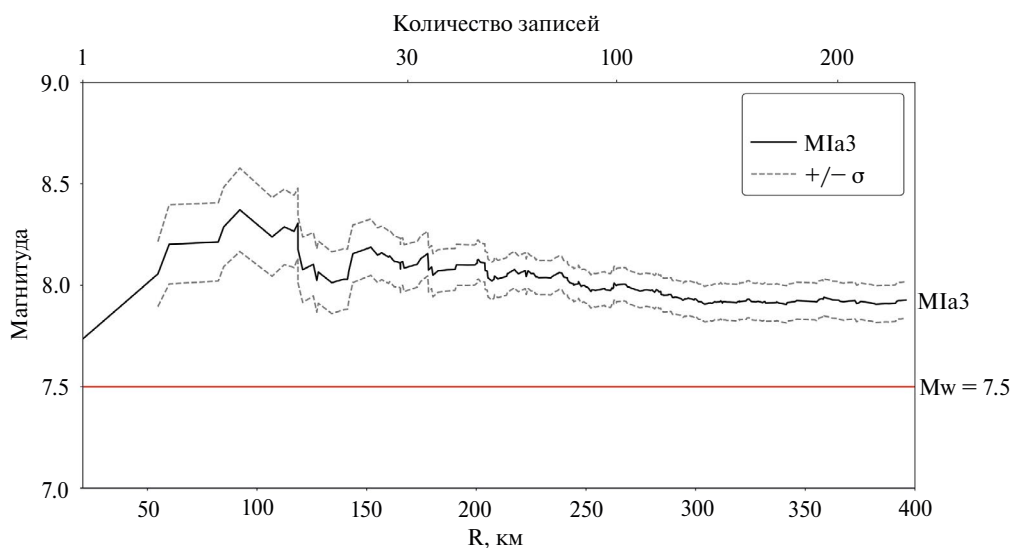


Рис. 7. Зависимость средней оценки M_{Ia3} от количества измерений для валидационного землетрясения 01.01.2024 г. в Японии ($M_w = 7,5$)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, No. 20. P. 2981–2987.
2. Oth A., Miyake H., Bindi D. On the relation of earthquake stress drop and ground motion variability // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017. Vol. 122, No. 7. P. 5474–5492. <https://doi.org/10.1002/2017JB014026>
3. Picozzi M., Bindi D., Spallarossa D., Oth A., Di Giacomo D., Zollo A. Moment and energy magnitudes: diversity of views on earthquake shaking potential and earthquake statistics // *Geophys. J. Intern.* 2019. No. 2. P. 1245–1259. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy488>
4. Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Di Giacomo D., Heinloo A., Evans P., Cotton F., Tilmann F. Enriching the GEOFON seismic catalog with automatic energy magnitude estimations // *Earth Syst. Sci. Data.* 2024. Vol. 16, No. 4. P. 1733–1745. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1733-2024>
5. Parolai S., Spallarossa D., Oth A. et al. A Proposal for a High Frequency Earthquake Magnitude (m3Hz) for Seismic Hazard and Rapid Damage Assessment // *Seismol. Res. Lett.* 2024. Vol. 96, No. 3. P. 1665–1674. <https://doi.org/10.1785/0220240226>
6. Ottemöller L., Havskov J. Moment Magnitude Determination for Local and Regional Earthquakes Based on Source Spectra // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003. Vol. 93, No. 1. P. 203–214. <https://doi.org/10.1785/0120010220>
7. Hanks T.C., Johnston A.C. Common features of the excitation and propagation of strong ground motion for North American earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992. Vol. 82, No. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010001>
8. Kononov A., Orlin I., Stepnov A., Stepnova Yu. Physically Based and Empirical Ground Motion Prediction Equations for Multiple Intensity Measures (PGA, PGV, Ia, FIV3, CII, and Maximum Fourier Acceleration Spectra) on Sakhalin Island // *Geosciences.* 2023. Vol. 13, No. 7. 201. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070201>
9. Xu B., Rathje E.M., Hashash Y.M.A., Stewart J.P., Campbell K.W., Silva W.J. κ_0 for soil sites: Observations from KiK-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis // *Earthq. Spectra.* 2020. Vol. 36. P. 111–137. <https://doi.org/10.1177/8755293019878188>
10. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (date of access: 04.06.2025).
11. NIED. F-net. URL: <https://www.fnet.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025).
12. AIST. Active fault database of Japan. URL: https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi/segment_param_e?SearchTYPE=&fval_type1=329-04&segment_id=329-04&topic_list=2&search_mode=2 (date of access: 04.06.2025).
13. Yoshida K., Takagi R., Fukushima Y., Ando R., Ohta Yu., Hiramatsu Y. Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake // *Geophysical Research Letters.* 2024. Vol. 51. e2024GL110993. <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>
14. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Finite Fault // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/finite-fault> (date of access: 04.06.2025).
15. Nakajima J. Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan // *Earth, Planets and Space.* 2022. Vol. 74. 160. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>
16. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Interactive Map // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/map> (date of access: 04.06.2025).
17. NIED K-NET, KiK-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. URL: <https://www.kyoshin.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025). <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
18. Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М. Моделирование движения грунта при Петропавловском землетрясении 24.11.1971 (M = 7,6) // *Физика Земли.* 2009. № 5. С. 29–38.
19. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios // *Pure Appl. Geophys.* 2011. Vol. 168, No. 1/2. P. 85–104. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0150-9>

REFERENCES

1. Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* 1977;82(20):2981–2987.
2. Oth A., Miyake H., Bindi D. On the relation of earthquake stress drop and ground motion variability. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017;122(7):5474–5492. <https://doi.org/10.1002/2017JB014026>
3. Picozzi M., Bindi D., Spallarossa D., Oth A., Di Giacomo D., Zollo A. Moment and energy magnitudes: diversity of views on earthquake shaking potential and earthquake statistics. *Geophys. J. Intern.* 2019;2:1245–1259. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy488>
4. Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Di Giacomo D., Heinloo A., Evans P., Cotton F., Tilmann F. Enriching the GEOFON seismic catalog with automatic energy magnitude estimations. *Earth Syst. Sci. Data.* 2024;16(4):1733–1745. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1733-2024>
5. Parolai S., Spallarossa D., Oth A. et al. A Proposal for a High Frequency Earthquake Magnitude (m3Hz) for Seismic Hazard and Rapid Damage Assessment. *Seismol. Res. Lett.* 2024;96(3):1665–1674. <https://doi.org/10.1785/0220240226>
6. Ottemöller L., Havskov J. Moment Magnitude Determination for Local and Regional Earthquakes Based on Source Spectra. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2003;93(1):203–214. <https://doi.org/10.1785/0120010220>
7. Hanks T.C., Johnston A.C. Common features of the excitation and propagation of strong ground motion for North American earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992;82(1):1–23. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820010001>
8. Konovalov A., Orlin I., Stepnov A., Stepnova Y. Physically Based and Empirical Ground Motion Prediction Equations for Multiple Intensity Measures (PGA, PGV, Ia, FIV3, CII, and Maximum Fourier Acceleration Spectra) on Sakhalin Island. *Geosciences.* 2023;13(7):201. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070201>
9. Xu B., Rathje E.M., Hashash Y.M.A., Stewart J.P., Campbell K.W., Silva W.J. κ_0 for soil sites: Observations from KiK-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis. *Earthq. Spectra.* 2020;36:111–137. <https://doi.org/10.1177/8755293019878188>
10. National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (date of access: 04.06.2025).
11. NIED. F-net. URL: <https://www.fnet.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025).
12. AIST. Active fault database of Japan. URL: https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi/segment_param_e?SearchTYPE=&fval_type1=329-04&segment_id=329-04&topic_list=2&search_mode=2 (date of access: 04.06.2025).
13. Yoshida K., Takagi R., Fukushima Y., Ando R., Ohta Yu., Hiramatsu Y. Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake. *Geophysical Research Letters.* 2024;51:e2024GL110993. <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>
14. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Finite Fault // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/finite-fault> (date of access: 04.06.2025).
15. Nakajima J. Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan. *Earth Planets Space.* 2022;74:160. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>
16. M 7.5 – 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake. Interactive Map // National Earthquake Information Center of United States Geological Survey. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/map> (date of access: 04.06.2025).
17. NIED K-NET, KiK-net / National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2010. URL: <https://www.kyoshin.bosai.go.jp> (date of access: 04.06.2025). <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>
18. Gusev A.A., Guseva E.M., Pavlov V.M. Modeling of the ground motion for the Petropavlovsk earthquake of November 24, 1971 ($M = 7.6$). *Fizika Zemli.* 2009;(5):29–38. (In Russ.).
19. Irikura K., Miyake H. Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios. *Pure Appl. Geophys.* 2011;168(1/2):85–104. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0150-9>