

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

Оригинальная статья

К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK

В.Б. Заалишвили , Д.А. Мельков , М.И. Фидарова, К.С. Харебов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 15.12.2023, доработана: 09.03.2024, принята к публикации: 11.03.2024

Резюме: Актуальность работы. Адекватная оценка проявления тех или иных сильных землетрясений представляет собой одну из главных задач инженерной сейсмологии. В то же время, несмотря на имеющиеся достижения в этой области, отдельные аспекты указанной задачи все еще остаются неясными. Использование мировых баз данных сильных движений, содержащих инструментальные записи землетрясений, включает унификацию не только данных о землетрясениях, таких как магнитуда, но и макросейсмический эффект или проявленный сейсмический эффект, соответствующий записи, на той или иной конкретной площадке. Одними из самых всеобъемлющих баз данных являются японские базы данных K-NET и KiK-net. **Целью работы** являлось установление соотношения для пересчета интенсивностей по JMA (Япония) в – MSK (Россия). **Методы.** Сопоставление и анализ реальных данных, приведенных в литературных источниках и их интерполяция. **Результаты.** Выполнен анализ известных способов получения соотношений между различными сейсмическими шкалами мира. Установлены неравномерности указанных шкал, обусловленные особенностями реакции объектов-индикаторов. Выявлены наиболее обоснованные соотношения для пересчета величин интенсивностей, полученных в различных диапазонах сейсмической шкалы JMA, в величины сейсмической шкалы MSK или MMI (США, Европа).

Ключевые слова: макросейсмическая интенсивность, инструментальные записи, база данных сильных движений, сейсмическая шкала, соотношения, анализ.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 19-35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

Original paper

On the issue of converting the seismic intensity of the Japan Meteorological Agency (JMA) scale into the MSK macroseismic scale

V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov , M.I. Fidarova , K.S. Kharebov 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: vzaal@mail.ru

Received: 15.12.2023, revised: 09.03.2024, accepted: 11.03.2024

Abstract: Relevance. Adequate assessment of the effect of certain strong earthquakes is one of the main tasks of engineering seismology. At the same time, despite the achievements in this area, certain aspects of this task still remain unclear. The use of global strong motion databases containing instrumental records of earthquakes involves the unification of not only earthquake data, such as magnitude, but also the macroseismic effect, or the seismic effect corresponding to the record, at a particular site. Some of the most comprehensive databases are the Japanese K-NET and KiK-net databases. **The aim** of the paper was to establish a relationship for converting intensities from JMA (Japan) to MSK (Russia) scale. **Methods.** Comparison and analysis of real data given in literature sources and their interpolation. **Results.** An analysis of known methods for obtaining relationships between various seismic scales of the world was performed. The unevenness of these scales was established, due to the peculiarities of the reaction of indicator objects. The most reasonable relationships have been identified for converting intensity values obtained in various ranges of the JMA seismic scale into values of the MSK or MMI seismic scale (USA, Europe).

Keywords: macroseismic intensity, instrumental records, strong motion database, seismic scale, relationships, analysis.

For citation: Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. On the issue of converting the seismic intensity of the Japan Meteorological Agency (JMA) scale into the MSK macroseismic scale. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 19-35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002

Введение

Определение сейсмических воздействий является актуальной задачей инженерной сейсмологии. Поскольку значения баллов непосредственно не используются в инженерных расчетах, требуются процедуры представления воздействий, соответствующих различным сейсмическим зонам. Пересчет баллов в ускорения по шкале MSK-64, используемой в СП 14.13330.2018, может приводить к заниженным значениям. Кроме того, при этом необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как преобладающий период и длительность воздействия [Аптикаев, 2021а, 2021б]. Таким образом, даже построение карт в единицах ускорений не гарантирует точности оценки сейсмического эффекта, поскольку интенсивность является комплексной величиной. С одной стороны, есть запрос проектировщиков иметь четкие параметры сейсмических воздействий для расчетов зданий и сооружений, а с другой стороны, увязка этих параметров с макросейсмическими данными приводит к

необходимости разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности, удовлетворяющей требованиям всех сторон процесса и отражающей происходящие физические процессы, причем, на основе современных инструментальных данных.

Необходимость пересчета сейсмической интенсивности JMA возникла в связи с разработкой инструментальной меры сейсмической интенсивности на основе записей баз данных сильных движений [Заалишвили и др., 2022; Фидарова и др., 2023]. В Геофизическом институте ВНИЦ РАН еще в 2003 году по инициативе В.Б. Заалишвили была создана база данных сильных движений, включающая данные практически со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Армения, Грузия) [Заалишвили и др., 2002, 2013]. Для анализа собранного материала в процессе выполнения данной работы были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой инструментальных наблюдений K-NET, созданной за один год, сразу после разрушительного землетрясения в Кобе (Япония, 1995) [Kinoshita, 2003; National Research..., 2019]. База данных ГФИ ВНИЦ РАН, сформированная по записям сильных движений сети K-NET и другим записям сильных землетрясений, содержит более 80 000 записей на 1000 станций, расположенных на участках с различными грунтовыми условиями. Здесь интенсивность проявления по сейсмической шкале MSK меняется от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г. по декабрь 2013 г. Кроме того, в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Различия в дифференциации сейсмических шкал, очевидно, связаны с различиями в типах застройки, культурными и историческими различиями, в целом, проявляющимися в различиях предметов быта, особенности движения которых, должны проявляться при сопоставлении описаний слабых воздействий. Также следует ожидать, что японская шкала JMA (шкала японского метеорологического агентства) имеет больше отличий по сравнению с остальными шкалами. Опираясь на работу [Musson et al., 2009] мы рассматривали шкалы семейства MSK, MMI и EMS, как близкие друг другу. При этом известно, что между ними, тем не менее, имеются заметные различия, главным образом, в силу их большей или меньшей степени неравномерности в сравнении с инструментальными параметрами [Шебалин, 1975; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Так сейсмическая шкала JMA оказалась неравномерной и в настоящее время модернизируется: так, например, диапазоны соответствующие 5 и 6 баллам поделены пополам [Аптикаев, Эртелева, 2016]. Поэтому, в первом приближении шкалы MMI (MCS), MSK можно принять равномерными, хотя их внутренняя неравномерность может достигать 0,2–0,3 балла [Аптикаев, Шебалин, 1988].

При этом сам анализ соотношений сейсмических шкал позволяет установить различные аспекты проявления макросейсмического эффекта с целью разработки более общей, равномерной и объективной шкалы. Также важен японский опыт разработки инструментальной шкалы JMA [Yamazaki et al., 1998], которая и представлена в современных японских базах данных сильных движений. Формальное применение процедуры расчета данной инструментальной интенсивности для землетрясений Калифорнии выполнено в работе [Shabestari, Yamazaki, 2001].

Методы. Пересчет интенсивности JMA в MSK (MMI)

Итак, в уже отмеченной базе данных сильных движений приводится максимальная интенсивность в величинах японской шкалы. Для практического приме-

нения требуется пересчет в используемую нами шкалу MSK (и, соответственно, ШСИ-17).

Первое соотношение, которое могло быть получено для пересчета интенсивностей приводится в работе [Hirono, Sato, 1971] и основывается на связи интенсивности MMI с ускорением, опубликованной Гутенбергом и Рихтером в 1942 году [Gutenberg, Richter, 1942; Richter, 1958; Рихтер, 1963]:

$$\lg a = \frac{I_{MMI}}{3} - \frac{1}{2} \quad (1)$$

и интенсивности JMA с ускорением, полученной Кавасуми [Kawasumi, 1943]:

$$a = 0,8 \cdot 10^{(I_{JMA}-0,5)/2}, \quad (2)$$

где ускорения a выражены в см/с².

Тогда соотношение между интенсивностью MMI и JMA, будет иметь следующий вид:

$$I_{MMI} = 1,5I_{JMA} + 0,5 \quad (3)$$

Данное выражение можно встретить в некоторых работах, в частности, в работе Э.Е. Хачияна [Хачиян, 2008].

Работой, в которой дается сопоставление сейсмических шкал MMI и JMA, а также первой сейсмической шкалы С.В. Медведева, известной, как сейсмическая шкала ГЕОФИАН, является отчет, выполненный по заказу Комиссии по атомной энергии США [Barosh, 1969]. Сопоставление было выполнено согласно описаниям шкал (рис. 1).

Позже, в работе японских исследователей [Hirono, Sato, 1971] было выполнено сопоставление оценок интенсивностей землетрясений, выполненных по обеим шкалам JMA и MMI. В 1964 году Межправительственное совещание ЮНЕСКО по сейсмологии и сейсмостойкости (Париж, 1964 г.), признало важность разработки единой международной шкалы интенсивности и рекомендовало временное применение сейсмической шкалы MSK 1964 г. К тому времени в Японии сейсмическая шкала JMA использовалась уже более 70 лет.

В 1967 году в Японии был начат проект, направленный на сравнительное определение интенсивностей с помощью обеих сейсмических шкал, по данным 106 метеостанций Японского метеорологического агентства, которые были распределены по всем японским островам. Описание шкалы MSK-64 было переведено на японский язык, что позволило производить оценку непосредственно по каждой шкале. Для населения были созданы опросные листы. Необходимо отметить, что по странному стечению обстоятельств значимые колебания, традиционно активно ощущавшиеся на станциях, в 1967–1968 гг. не наблюдались. В то же время, в последующие два года наблюдались исключительно только сильные землетрясения ($M > 6.0$). Интенсивность MSK, по результатам обработки данных каждой опросной анкеты, определялась по 10 сильным землетрясениям, включая землетрясение Tokachi от 1968 года [Hirono, Sato, 1971].

UNITED STATES Modified Mercalli (Wood and Newmann, 1931)	RUSSIA GEIOFIAN (Medvedev, 1953)	JAPAN Japanese (Kawasumi, 1951)
I	I	0
II	II	I
III	III	
IV	IV	II
V	V	III
VI	VI	IV
VII	VII	V
VIII	VIII	
IX	IX	VI
X	X	
XI	XI	VII
XII	XII	

Рис. 1. Соотношение между шкалами MMI, GEIOFIAN и JMA, приведенное в работе [Barosh, 1969] /

Fig. 1. The relationship between the MMI, GEIOFIAN and MSK scales, given in [Barosh, 1969]

В результате анализа были получены следующие выражения [Hirono, Sato, 1971]:

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 1,5 \quad (4)$$

- для интенсивностей MSK от 3 до 5 баллов;

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75 \quad (5)$$

- для интенсивностей MSK от 5 до 8 баллов.

В работе [Wong, Trifunac, 1979] было выполнено сравнение оценок MMI и JMA со значениями максимальных ускорений, полученных идентичными акселерографами SMAC, и для диапазона интенсивностей MMI от 4 до 8 баллов была получена следующая формула:

$$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2 \quad (6)$$

Полученные в работе [Wong, Trifunac, 1979] соотношения между шкалами в сравнении с данными [Barosh, 1969] приведены на рис. 2.

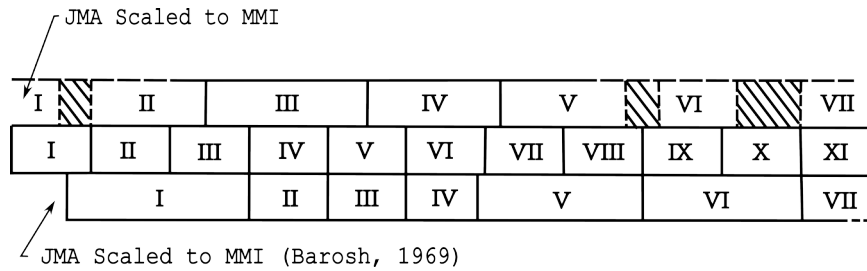


Рис. 2. Сопоставление шкал MMI и JMA приведенное в работе [Wong, Trifunac, 1979] /
Fig. 2. Comparison of MMI and JMA scales given in [Wong, Trifunac, 1979]

Для пересчета в базе данных перевод в шкалу MSK был произведен по [Kramer, 1996], где было приведено (рис. 3) соответствие разных шкал по данным [Richter, 1958; Murphy, O'Brien, 1977].

MMI	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
JMA	I		II	III	IV	V		VI	VII			
MSK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Рис. 3. Соответствие шкал измерения интенсивности сейсмического воздействия [Kramer, 1996] /

Fig. 3. Correspondence of seismic intensity measurement scales, given in [Kramer, 1996].

В соответствии с работой [Kramer, 1996] перевод данных, определенных по шкале японского метеорологического общества (JMA), в шкалу MSK производился с использованием следующих коэффициентов – таблица 1. Данное соотношение использовалось при формировании базы данных Геофизического института [Залишвили и др., 2002, 2013].

Таблица 1 / Table 1

**Коэффициенты перевода из шкалы JMA в MSK /
Conversion coefficients from the JMA to MSK scale**

JMA	MSK	Выражение перевода Conversion expression
0 – 0,2	0,5 – 1	$JMA * 2,5 + 0,5$
0,2 – 0,4	1 – 2	$JMA * 5 + 0,0$
0,4 – 1	2 – 3	$1,67 * JMA + 1,33$
1 – 4	3 – 6	$1,0 * JMA + 2,0$
4 – 7	6 – 12	$2,0 * JMA - 2,0$

В работе [Shabestari, Yamazaki, 2001] выполнено сравнение данных об интенсивности MMI записей землетрясений Калифорнии с инструментальной шкалой JMA, и в результате анализа было получено выражение с достаточно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,7$). При этом следует иметь в виду, что оно получено для средних значений инструментальной интенсивности, соответствующих целым значениям MMI:

$$I_{MMI} = 1,95I_{JMA} - 2,91 \quad (7)$$

Соколовым и Фурумурой было получено соотношение между шкалами MMI и JMA на основе анализа 598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, полученных в 1999–2007 гг. [Sokolov., Furumura, 2008]:

$$I_{MMI} = 1,743I_{JMA} - 0,584 \quad (8)$$

В работе [Musson et al., 2009] рассмотрено соотношение основных современных шкал с EMS-98, в том числе, и современная версия шкалы JMA 1996 года. Отмечены отличительные особенности шкалы JMA. При интенсивности 3 шкалы JMA с одной стороны «большинство людей, находящихся в помещении, ощущают землетрясение, некоторые из находящихся вне помещений ощущают землетрясение, большинство из тех, кто спит, просыпаются», что соответствует 5 EMS («ощущается большинством людей в помещениях, вне помещений только немногими, многие спящие люди пробуждаются, некоторые испуганы»), но при этом интенсивность 3 является также порогом, при котором начинается реакция легких предметов – «посуда на полках иногда издает какой-то звук» (дословный перевод), что соответствует интенсивности 4 EMS – «окна и двери скрипят, дребезжит посуда», а иногда и 3 EMS – «находящиеся в покое в помещении люди ощущают раскачивание или легкое дрожание»). В шкале MSK «дребезжание окон, стекол шкафов, посуды» наблюдается при 4 баллах (включающих также такие эффекты, как «легкий скрип полов и стен; заметно легкое колебание жидкости в открытых сосудах»). Шкала JMA необычна тем, что имеет нулевую степень – землетрясение не ощущается, в большинстве шкал это соответствует интенсивности равной единице. В версии 1996 года количество степеней было увеличено с семи до девяти путем деления интенсивности 5 на две категории «5L» и «5U», и аналогично для интенсивности 6. В настоящее время шкала JMA используется путем преобразования инструмен-

тальных параметров движения грунта в значения псевдоинтенсивности [Yamazaki et al., 1998]; поэтому неизвестно, соответствует ли указанное значение интенсивности землетрясения описанию эффектов для этой степени наблюдаемого масштаба или нет.

По результатам анализа различных шкал в работе [Musson et al., 2009] приводится соотношение различных сейсмических интенсивностей с EMS-98 – таблица 2. Большинство шкал имеют максимальную степень, которая в той или иной форме определяется как «все разрушено». Смысл этого неоднозначен и зависит от состояния застройки, поэтому полное разрушение может произойти при меньших значениях интенсивности. В таких случаях шкалы интенсивности насыщаются при значении около 9 EMS. Это особая проблема со шкалой Росси-Фореля (RF), в которой присутствует скачкообразное изменение повреждений от умеренного при 9 RF до полного разрушения при 10 RF. Дополнительные признаки, не связанные с повреждениями зданий, например, крупномасштабные изменения ландшафта, проявляются только при максимальных воздействиях и не помогают определить степень интенсивности при сопоставлении шкал. Так, согласно таблице 2 в большинстве случаев высшая степень старых шкал не определена с точки зрения EMS (но может предполагаться высокой). Вопрос не является критическим, поскольку эти высшие степени разрушений редки, если вообще когда-либо, используются на практике [Musson et al., 2009].

Таблица 2 / Table 2

**Рекомендации по переходу с пяти основных шкал на EMS-98, приведенные в работе [Musson et al., 2009] /
Recommendations for the conversion from the five main scales to EMS-98, given in [Musson et al., 2009]**

RF	EMS-98	MCS	EMS-98	MMI 56	EMS-98	MSK	EMS-98	JMA-96	EMS-98
								0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2 or 3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4 or 5
4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5L	6
6	5	6	6	6	6	6	6	5U	7
7	6	7	7	7	7	7	7	6L	8
8	7 or 8	8	8	8	8	8	8	6U	9 or 10
9	9	9	9	9	9	9	9	7	11
10	- ^a	10	10	10	10	10	10		
		11	11	11	- ^a	11	11		
		12	- ^a	12	- ^a	12	- ^a		

-^a интенсивность определяется на основе признаков, которые не отражают силу воздействия или достигают насыщения.

Для определения соотношений по схематичным (рис. 1, 3) и табличным (таблица 2) данным нами рассматривались границы баллов каждой шкалы как промежуточное значение ± 0.5 соответствующего целого балла. Этот метод был применен для данных, приведенных в [Barosh, 1969], [Kramer, 1996] и [Musson et al., 2009]. В последнем случае, для уточненной шкалы JMA-96, значениям 5L и 5U приписывались значения 5.25 и 5.75, предполагая равномерность шкалы в пределах каждого балла и аналогично для 6L и 6U.

На рис. 4 приведено сопоставление всех рассмотренных зависимостей интенсивности MSK от JMA.

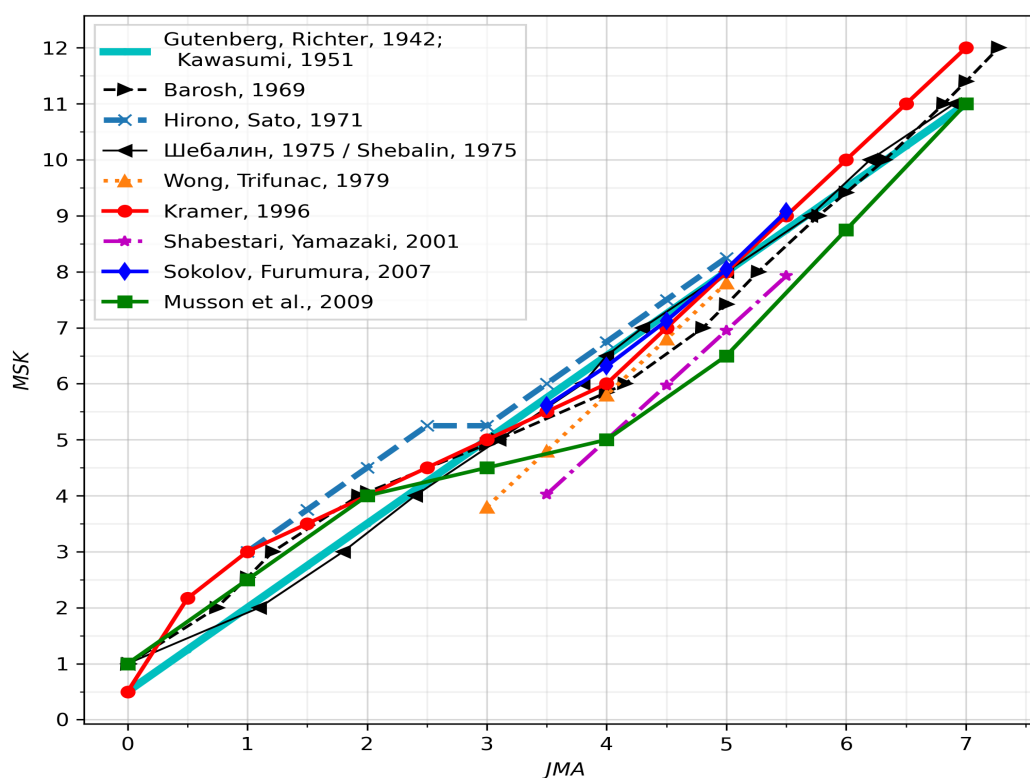


Рис. 4. Пересчет интенсивности JMA в MSK по различным источникам /

Fig. 4. Conversion of JMA to MSK intensity from various sources

Соответствие шкал MMI и MSK согласно табл. 3 позволяет использовать приведенные выше зависимости, полученные для MMI, непосредственно для оценки интенсивности по шкале MSK. Необходимо отметить, что для строк 2, 4, 9 нами были впервые получены выражения, по приведенной методике, для перевода данных из одних шкал в другие. В строке 6 приведено выражение, полученное нами ранее [Заалишвили и др., 2002]. Выражения для перевода, приведенные в строках 1, 3, 5, 7, 8 таблицы 3, получены соответствующими авторами. В связи с тем, что с практической точки зрения нам необходимы исключительно сильные движения (использование базы данных K-NET для задания сейсмических воздействий) все соотношения приведены для интенсивности более 6 MSK.

Таблица 3 / Table 3

Соотношения между шкалами MSK (MMI, EMS) и JMA для сильных землетрясений (MSK ≥ 6) /Relationships between the MSK (MMI, EMS) and JMA scales for strong earthquakes (MSK ≥ 6)

	Источник / Source	Соотношение интенсивности JMA с MSK (MMI) ≥ 6 / Relation of JMA with MSK (MMI) ≥ 6	Использованные методы / used methods
1.	Gutenberg, Richter, 1942; Kawasumi, 1951	$I_{MM} = 1,5I_{JMA} + 0,5$	Через выражения для PGA, полученные для каждой шкалы Through expressions for PGA obtained for each scale
2.	Barosh, 1969	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,24$ (interpolation, this study)	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
3.	Hirono, Sato, 1971	$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75$	Одновременная оценка проявления землетрясения двумя шкалами Simultaneous assessment of earthquake manifestations using two scales
4.	Shebalin, 1975	$I_{MSK} = 1,58I_{JMA} + 0,12$ (interpolation, this study)	Прямое сравнение текста шкал, метод анализа относительных площадей изосейст Direct comparison of scale text, method of analysis of relative isoseismal areas
5.	Wong, Trifunac, 1979	$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2$ $4 \leq MMI \leq 8$	Сопоставление PGA PGA matching
6.	Kramer, 1996, after Richter (1958) and Murphy and O'Brien (1977)	$I_{MSK} = 2,0I_{JMA} - 2,0$ (interpolation [Заалишвили и др., 2002])	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
7.	Shabestari, Yamazaki, 2001	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,91$ $4 \leq MMI \leq 8$	Применение методики инструментальной шкалы JMA к записям, для которых известны MMI (105 записей землетрясений Калифорнии) Application of the JMA instrumental scale technique to records for which MMIs are known (105 California earthquake records)
8.	Sokolov, Furumura, 2008	$I_{MMI} = 1,743I_{JMA} - 0,584$ $MMI > 5,5$	Анализ записей ускорений (598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, 1999-2007) Analysis of acceleration records (598 records of accelerations of nine Japanese earthquakes with magnitudes from 6.3 to 8.0, 1999-2007)
9.	Musson et al., 2009	$I_{MMI} = 2,25I_{JMA} - 4,75$ (interpolation, this study)	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions

Результаты и обсуждение

В результате исследования можно выделить несколько способов пересчета сейсмических интенсивностей:

1. Сопоставление описаний сейсмических шкал [Barosh, 1969; Шебалин, 1975; Kramer, 1996; Musson et al., 2009]. Здесь во многом результат зависит от опыта, а интерпретация носит авторский характер, как, например, это принято при создании геологических карт. При этом достаточно сложно оценить точность результатов. Для формализации процедур пересчета использовались схемы, приведенные в соответствующих публикациях. Для диапазона $MSK \geq 6$ выполнена интерполяция. Коэффициент регрессии перед JMA имеет значительный диапазон значений – от 1,58 до 2,25.

2. Сопоставление зависимостей инструментальных параметров от интенсивности, в первую очередь, ускорений [Wong, Trifunac, 1979]. Первый вариант такого пересчета можно сделать по данным [Gutenberg, Richter, 1942] и [Kawasumi, 1951]. Отдельно следует отметить расчет инструментальной интенсивности JMA по записям, для которых имелись значения интенсивностей MMI [Shabestani, Yamazaki, 2001] и других инструментальных мер сейсмической интенсивности [Sokolov, Furumura, 2008]. Коэффициент регрессии перед JMA по разным источникам составляет 1,5, 2,0 и 2,25.

3. Оценка макросейсмического эффекта по обеим шкалам по данным происшедших землетрясений по соответствующим методикам для обеих шкал [Hirono, Sato, 1971]. Коэффициент регрессии перед JMA составил 1,5.

4. Следует отметить принцип сравнения радиусов последовательных изосейст или площадей последовательных изосейст. Данный метод представлен исключительно в отечественных работах [Шебалин, 1975; Ершов, Шебалин, 1984; Аптикаев, Шебалин, 1988] и основан на сопоставлении уравнения макросейсмического поля, построенного для данной шкалы. Подход позволяет непосредственно оценить равномерность шкалы, определяющую возможности ее применения для вычисления приращений интенсивностей.

В результате сопоставления выражений пересчета интенсивностей, не обнаруживается каких-либо специфичных для каждого метода значений масштабирующего коэффициента. В целом для землетрясений интенсивностью $MSK \geq 6$ коэффициент регрессии соответствует 2.

Следует отметить, что мы использовали регрессионные соотношения, выполнив привязку целых и дробных баллов значениям шкал. Поскольку интенсивность является интегральной характеристикой сейсмических эффектов, она как раз часто выражается в практике написания интенсивности римскими цифрами, чтобы подчеркнуть, что они целые и неделимые [Musson et al., 2009]. В то же время, иногда отмечается практика добавления десятичных знаков к арабским цифрам после интенсивности, записанной римскими цифрами (например, в работе [Klugel, 2005]). Современная тенденция состоит в том, чтобы записывать интенсивности арабскими цифрами, поскольку с ними легче работать, но они, тем не менее, являются целочисленными классами. Следует отметить, что эти ограничения применимы к интенсивности, оцениваемой на основе наблюдений, а не к прогнозируемой интенсивности, выведенной из модели. Именно изучение макросейсмических эффектов по радиусам или площадям различных зон позволяет установить близость этих двух величин [Шебалин, 1975].

В идеале преобразование вообще не должно производиться. Правильная и лучшая процедура – вернуться к исходным данным и переназначить значения в выбранной шкале интенсивности [Ambraseys et al., 1983; Grunthal, 1998]. Зачастую это невозможно потому, что исходных данных больше не существует. В таких случаях необходима некоторая форма преобразования. В этой связи физическое обоснование меры сейсмической интенсивности должно позволить производить более точный пересчет сейсмических интенсивностей между различными шкалами. Единственной работой, в которой независимо по обеим шкалам оценивался исходный материал, является работа [Hirono, Sato, 1971] и где достаточно представительный материал отсутствует.

Пример соотношений между одними шкалами позволяет проводить сопоставление для других шкал. Следует особо отметить, что здесь мы предполагаем совпадение шкал MSK, MMI и EMS, что отражено в работе Муссона [Musson et al., 2009]. Более детальное сопоставление шкал может быть выполнено при переходе к шкалам нового поколения, в которых выполнено деление на объекты-индикаторы и описаны их реакции, как это сделано в ШСИ-2017 (ГОСТ Р 57546-2017). При этом шкалы могут отражать региональные особенности строительства – различные типы конструкций характерных для той или иной территории и предметов быта. Данные шкалы ШСИ-2017 могли бы быть дополнены объектами-индикаторами, на основе эмпирических данных и данных моделирования, что позволит выполнить сопоставление различных шкал на основе сравнения эффектов, как в первом варианте введенной нами классификации. Но это сравнение выполнить количественно с возможностью оценки точности результатов, что в дальнейшем может послужить основой для разработки универсальной международной шкалы сейсмической интенсивности.

Здесь также следует иметь в виду, что тот или иной индикатор качественно может проявляться в разных диапазонах интенсивностей, в зависимости от частоты воздействия. Данные наблюдений в совокупности реакций различных объектов позволили бы повысить точность макросейсмических обследований и точность прогнозов и оценки рисков. Современные требования сейсмостойкого проектирования и строительства предполагают необходимость большей детализации оценок воздействий, что приводит к использованию в практике дробных значений баллов сейсмической интенсивности. Однако такое представление предполагает равномерность изменения «воздействия», или иными словами – «макросейсмическая шкала должна являться не шкалой порядка, а шкалой интервалов» [Ершов, Шебалин, 1984]. Общая неравномерность шкал балльности и, возможно, в большей степени в MMI отмечается в работах [Шебалин, 1975; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Сопоставление шкал MSK (шкала Медведева, ГЕОФИАН) и MMI по разным источникам представлено на рис. 5. Следует иметь в виду, что в работе [Barosh, 1969] выполнялось сопоставление версий шкал Меркалли и Медведева, действовавших на тот момент, и которые многократно дорабатывались в дальнейшем. Тем не менее, в целом наблюдается соответствие с данными, приведенными позднее в [Kramer, 1996]. На рис. 5 также приводится соотношение между шкалой MSC, используемой на тот момент для оценки макросейсмического эффекта и «равномерной шкалой», полученное по материалам 29 землетрясений Македонии Н.В. Шебалиным [Шебалин, 1975]. Формализация признаков, выполненная в ШСИ-2017, позволяет определять границы чувствительности каждого объекта-индикатора (которые могут быть дроб-

ными), и в перспективе повысить «равномерность» значений шкалы при условии наличия представительного фактического материала.

Сопоставление соотношений между шкалами семейства Меркалли (ММІ) и Медведева (MSK), полученными различными авторами [Barosh, 1969; Kramer, 1996] с данными Шебалина по распределению изосейст землетрясений Македонии [Шебалин, 1975], позволяет сделать вывод, что сейсмическая шкала MSK является наиболее равномерной, во всяком случае, в диапазоне от 3 до 5,5 баллов, т.е. шкалой «интервалов». Возможно, это послужило одним из факторов развития инструментального метода сейсмического микрорайонирования, поскольку позволяет использовать интенсивность как величину, а не как категориальный признак.

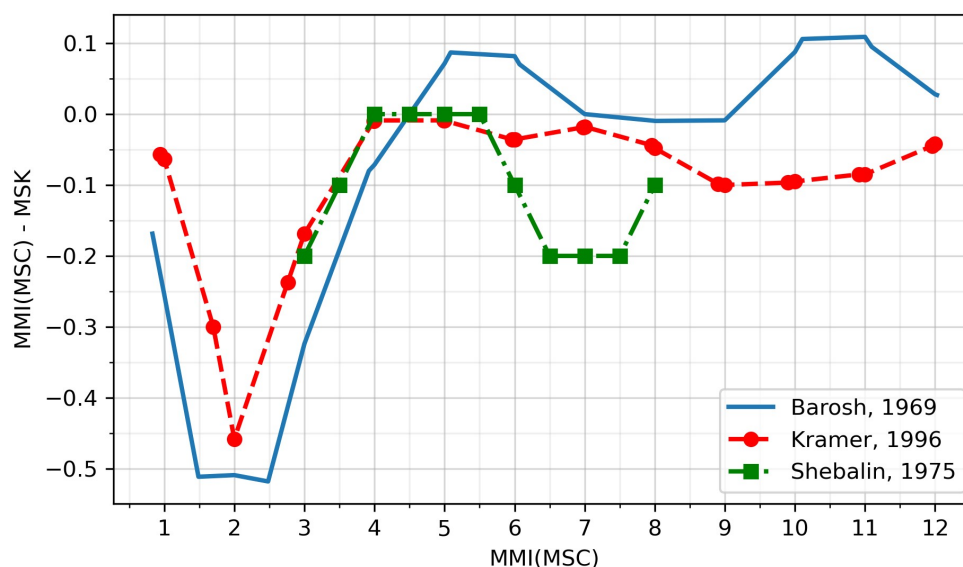


Рис. 5. Соотношение между шкалами ММІ и MSK по данным [Barosh, 1969; Kramer, 1996] и «равномерность» шкалы MCS (ММІ) по материалам землетрясений Македонии [Шебалин, 1975] /

Fig. 5. Relationship between the MMI and MSK scales according to [Barosh, 1969; Kramer, 1996] and the “uniformity” of the MCS (MMI) scale based on materials of earthquakes in Macedonia [Shebalin, 1975]

Также отмечается несоответствие всех шкал при максимальных значениях интенсивности, поскольку признаки, основанные на повреждении и разрушении зданий, достигают насыщения, а также в силу особенностей развития шкалы JMA, поскольку верхний предел повышался после более разрушительных землетрясений и фактически максимум не определен [Musson et al., 2009]. На наш взгляд здесь нет необходимости приравнивать максимальные значения интенсивностей по разным шкалам, а продолжить полученный тренд для интенсивностей, близких к границам шкал.

«Цифровизация» шкал также позволяет приблизиться к установлению связи макросейсмической интенсивности и параметров сейсмического воздействия. И здесь полезен опыт инструментальной шкалы JMA, поскольку учитывает продолжительность и спектральные особенности воздействия. Формальное применение этой шкалы к другой территории, как это сделано в работе [Shabestari, Yamazaki, 2001] не даст объективный результат, т.к. здесь стоит задача определения частотного фильтра для той или иной территории. Однако практическое использование данной методики является достаточно трудоемким и явно не отражает реальные физические процессы и не нашло распространения. Инструментальную меру JMA полученную для

территории Японии, по представительному набору инструментальных данных для территории Японии, можно считать соответствующей одноименной макросейсмической интенсивности JMA и в первом приближении использовать для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности по базам данных Японии. Для понятного и практически ценного результата (который можно будет верифицировать по всемирным данным) удобно использовать макросейсмическую интенсивность MSK (современной ШСИ-2017), которая является более равномерной.

Выводы

1. Выполнен анализ известных способов получения соотношений между различными сейсмическими шкалами мира. Установлены неравномерности указанных сейсмических шкал, обусловленные особенностями реакции объектов-индикаторов. Выявлены наиболее обоснованные соотношения для пересчета величин интенсивностей, полученных в различных диапазонах сейсмической шкалы JMA, в величины сейсмической шкалы MSK или MMI (США, Европа).

2. Анализ многочисленных имеющихся работ показывает различия в зависимостях, порой достигающих двух баллов; наибольшей неравномерностью шкала JMA обладает в интервале интенсивностей от 4 до 6 MSK, однако, можно отметить, что в диапазоне MSK > 6 зависимость между шкалами JMA и MSK можно считать линейной, при этом коэффициент регрессии, определенный по разным источникам примерно одинаков и равен 2.

3. Отмечено различие в верхней границе шкал, в данной области вместо формального приравнивания максимальных значений предложено продолжить полученный тренд (коэффициент регрессии).

4. Шкала MSK (современной версией которой является ШСИ-2017) является наиболее близкой к равномерной шкале, поэтому полученные для нее закономерности (связь интенсивности с инструментальными параметрами, уравнение макросейсмического поля) будут физически более обоснованными.

5. Формализация признаков, выполненная в ШСИ-2017 позволяет определять границы чувствительности каждого объекта-индикатора (которые могут быть дробными), и в перспективе повысить «равномерность» значений шкалы, на основе предложенного Медведевым метода сравнения площадей последовательных изосейст при условии наличия представительного фактического материала.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1988. – Вып. 29. – С. 98–108.
2. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Российская сейсмическая шкала нового поколения. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43. № 2. – С. 43–52.
3. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСР в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021а. – Т. 11. № 1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
4. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021б. – Т. 11. № 3. – С. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.
5. Ершов И.А., Шебалин Н.В. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов. // Прогноз сейсмических воздействий (Вопросы инженерной сейсмологии; Вып. 25). М.: Наука, – 1984. С. 78–96.

6. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. Комплекс вычислительных программ «НСВ-2» для обработки инструментальных записей природных и техногенных катастроф. // Труды Международной конференции «Информационные технологии и системы: наука и практика». – Владикавказ. – 2002. – С. 399–401.
7. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 3. – С. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537.
8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети K-Net. // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 2. С. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340.
9. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 670 с.
10. Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.
11. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. Ереван: Гитутюн, – 2008. 523 с.
12. Шебакин Н.В. О неравномерности шкалы балльности. // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М: Наука, – 1975. С. 222–233.
13. Ambraseys N.N., Banda E., Irving J., Mallard D., Melville C.P., Morse T., Muir Wood R., Munoz D., Serva L., Shilston D., Surinach E., Vogt J. Notes on historical seismicity. // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1983 – Vol. 73. – pp. 1917–1920.
14. Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings. // Geological Survey bulletin. – 1279. – 1969. – 93 p.
15. Grunthal G. (ed) European Macroseismic Scale 1998: EMS-98. // Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Conseil de l'Europe, Conseil de l'Europe. – 1998. – Vol. 15.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. // Seismol. Soc. America Bull. – 1942. – Vol. 32. No. 3. – pp. 163–191.
17. Hirono T., Sato K. MSK Intensity Scale as Compared with JMA Intensity Scale. // Papers in Meteorology and Geophysics. – 1971. – Vol. 22. – pp. 177–193. DOI: 10.2467/mripapers1950.22.3-4_177.
18. Kawasumi H. Intensity and intensity scale. (in Japanese), Zisin. – 1943. – Vol. 15. – pp. 6–12.
19. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times. // Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Tokyo. – 1951. – Vol. 29. – pp. 469–482.
20. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. // Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology. – 2003. – Vol. 81B. – pp. 1049–1056.
21. Klugel J-U Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants. // Eng. Geol. – 2005. – Vol. 78. – pp. 285–307. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.01.007.
22. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. – 1996. – pp. 65–84.
23. Murphy J.R., O'Brien L.J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1977. – Vol. 67. – pp. 877–915.
24. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // J. Seismol. – 2009. – Vol. 14. – pp. 413–428.
25. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. – 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.

26. Richter C.F. *Elementary seismology*, W.H. Freeman, San Francisco. – 1958.
27. Shabestari T.K., Yamazaki F. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with the MMI evaluated from three-component acceleration records. *Earthquake Spectra*. – 2001. – Vol. 17. No. 4. – pp. 711–723.
28. Sokolov V., Furumura T. Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations Using the Database Accumulated During Recent Large Earthquakes in Japan. // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24. – pp. 513–532. DOI: 10.1193/1.2923918.
29. Wong H.L., Trifunac M.D. Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms. // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 1979. – Vol. 7. – pp. 509–527.
30. Yamazaki F., Noda S., Meguro K. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan. // *Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability. (ICOSSAR '97)*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. – 1998. – pp. 1573–1580.

References

1. Aptikaev F.F., Shebalin N.V. Refinement of correlations between the level of macroseismic effect. Aptikaev F.F., Shebalin N.V. Refinement of correlations between the level of macroseismic effect and dynamic parameters of ground motion. *Problems of Engineering Seismology*. 1988. Vol. 29. pp. 98–108. (In Russ.)
2. Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Russian seismic scale of a new generation. *Problems of Engineering Seismology*. 2016. Vol. 43. No. 2. pp. 43–52. (In Russ.)
3. Aptikaev F.F. About GSZ maps in acceleration units. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008. (in Russ.)
4. Aptikaev F.F. An exceedance probability of the influence in the Building Code. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005. (In Russ.)
5. Ershov I.A., Shebalin N.V. The problem of designing an earthquake intensity scale from the perspective of seismologists. *Forecast of seismic impacts (Problems of engineering seismology Issue 25)*. Moscow. Nauka. 1984. pp. 78–96. (In Russ.)
6. Zaalishvili V.B., Kharebov A.K., Kharebov K.S. Complex of computing programs “NCB-2” for processing instrumental records of natural and man-made disasters. *Proceedings of the International Conference “Information Technologies and Systems: Science and Practice”*. Vladikavkaz. 2002. pp. 399–401. (In Russ.)
7. Zaalishvili V.B., Kharebov K.S., Kharebov A.K. Creation of databases of strong movements based on modern views. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537. (in Russ.)
8. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Kharebov K.S. Instrumental measure of seismic intensity based on K-Net data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022. Vol. 14. No. 2. pp. 331–340. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-331-340. (In Russ.)
9. Richter Ch.F. *Elementary seismology*. Moscow. Foreign Literary publishing house. 1963. 670 p. (In Russ.)
10. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Relationship between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of ground vibrations. *Geology and geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (In Russ.)
11. Khachiyani E.E. *Applied seismology*. Yerevan. Gitutyun. 2008. 523 p. (In Russ.)
12. Shebalin N.V. On the unevenness of the intensity scale. *Seismic scale and methods for measuring seismic intensity*. Moscow. Nauka. 1975. pp. 222–233. (In Russ.)
13. Ambraseys N.N., Banda E., Irving J., Mallard D., Melville C.P., Morse T., Muir Wood R., Munoz D., Serva L., Shilston D., Surinach E., Vogt J. Notes on historical seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1983 Vol. 73. pp. 1917–1920.

14. Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings. Geological Survey bulletin. 1279. 1969. 93 p.
15. Grunthal G. (ed) European Macroseismic Scale 1998: EMS-98. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Conseil de l'Europe, Conseil de l'Europe. 1998. Vol. 15.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. Seismol. Soc. America Bull. 1942. Vol. 32. No. 3. pp. 163–191.
17. Hirono T., Sato K. MSK Intensity Scale as Compared with JMA Intensity Scale. Papers in Meteorology and Geophysics. 1971. Vol. 22. pp. 177–193. DOI: 10.2467/mripapers1950.22.3-4_177.
18. Kawasumi H. Intensity and intensity scale. (in Japanese), Zisin. 1943. Vol. 15. pp. 6–12.
19. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, Tokyo. 1951. Vol. 29. pp. 469–482.
20. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology. 2003. Vol. 81B. pp. 1049–1056.
21. Klugel J-U Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants. Engineering Geology. 2005. Vol. 78. pp. 285–307. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.01.007.
22. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 1996. pp. 65–84.
23. Murphy J.R., O'Brien L.J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. Bulletin of the Seismological Society of America. 1977. Vol. 67. pp. 877–915.
24. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. Journal of Seismology. 2009. Vol. 14. pp. 413–428.
25. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.
26. Richter C.F. Elementary seismology, W.H. Freeman, San Francisco. 1958.
27. Shabestari T.K., Yamazaki F. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with the MMI evaluated from three-component acceleration records. Earthquake Spectra. 2001. Vol. 17. No. 4. pp. 711–723.
28. Sokolov V., Furumura T. Comparative Analysis of Two Methods for Instrumental Intensity Estimations Using the Database Accumulated During Recent Large Earthquakes in Japan. Earthquake Spectra. 2008. Vol. 24. pp. 513–532. DOI: 10.1193/1.2923918.
29. Wong H.L., Trifunac M.D. Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1979. Vol. 7. pp. 509–527.
30. Yamazaki F., Noda S., Meguro K. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan. In: Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability. (ICOSSAR '97). Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 1998. pp. 1573–1580