

УДК 550.34

DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

Оригинальная статья

## Спектры реакции колебаний грунта и макросейсмическая интенсивность землетрясений: некоторые статистические соотношения

Ю.К. Чернов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,  
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,  
e-mail: chenta-26@mail.ru, cgi\_ras@mail.ru

Статья поступила: 16.10.2025, доработана: 28.11.2025, принята к публикации: 01.12.2025

**Резюме: Цель исследований.** Получение новых данных о взаимосвязях между макросейсмическими и физическими характеристиками сильных движений грунта при землетрясениях и улучшение на этой основе способов прогнозирования возможных сейсмических воздействий в сейсмоактивных районах. **Актуальность работы.** Территория РФ по уровню сейсмической опасности разделена на зоны с различной макросейсмической интенсивностью (балльностью) сотрясений. Основанные же на этих данных расчеты на сейсмостойкость используют не сами макросейсмические баллы, а поставленные им в соответствие физические характеристики колебаний грунта – амплитуды и спектры реакции. Поэтому вопрос адекватности этих соответствий всегда имел первостепенное значение. Еще одна причина перманентной актуальности проводимых в данном направлении исследований – это то, что получаемые в их процессе данные являются одним из главных источников фундаментальных знаний о природе землетрясений и об их воздействии на окружающую среду и общество. **Объект исследования.** Макросейсмическая интенсивность сотрясений и спектры реакции колебаний грунта при землетрясениях и количественные соотношения между ними. **Методы исследования.** Комплексный анализ эмпирических и расчетных данных об уровнях спектральных ускорений колебаний грунта (SA) на различных фиксированных частотах (f) при землетрясениях разной силы (I) и построение на этой основе вероятностных моделей связи между ними при землетрясениях разных магнитуд (M) и удаленностей (D). **Результаты исследования.** Для каждой из 18-ти спектральных составляющих логарифмически равномерно распределенных по частотам в диапазоне 0,28–22 Гц, получены вероятностные оценки SA при различных сочетаниях M, D и I. Построены соответствующие вероятностные модели SA(M,D,I,f), посредством анализа которых выявлены частоты и соответствующие им уровни SA, не зависящие от M и D и определяющиеся только балльностью I. Эти частоты, свои для каждого значения I названы «ответственными» за макросейсмический эффект данной силы. Предложена методика определения макросейсмической интенсивности I по спектру реакции SA(f), позволяющая получать более точные оценки, чем традиционные методики оценок по единичным параметрам колебаний (амплитудам, периодам и др.).

**Ключевые слова:** землетрясения, макросейсмическая интенсивность землетрясений, спектры реакции колебаний грунта, сейсмическая опасность, сейсмические воздействия.

**Для цитирования:** Чернов Ю.К. Спектры реакции колебаний грунта и макросейсмическая интенсивность землетрясений: некоторые статистические соотношения. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 97–111. DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

Original paper

## Ground motion response spectra and macroseismic earthquake intensity: some statistical ratios

Yu.K. Chernov 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,  
e-mail: chenta-26@mail.ru, cgi\_ras@mail.ru

Received: 16.10.2025, revised: 28.11.2025, accepted: 01.12.2025

**Abstract: Aim.** Obtaining new data on the interrelations between macroseismic and physical characteristics of strong ground motions during earthquakes and improving methods for predicting possible seismic impacts in seismically active areas based on this. **Relevance.** According to the level of seismic hazard, the territory of the Russian Federation is divided into zones with different macroseismic intensity (in points) of earthquakes. Calculations based on these data for seismic resistance do not use the macroseismic intensity points themselves, but the corresponding physical characteristics of ground motions, such as amplitudes and reaction spectra. Therefore, the question of the adequacy of these compliances has always been of primary importance. Another reason for the permanent relevance of research conducted in this area is that the data obtained in their process is one of the main sources of fundamental knowledge about the nature of earthquakes and their impact on the environment and society. **Object.** The macroseismic intensity of earthquakes and the response spectra of ground motions during earthquakes and the quantitative relationships between them. **Methods.** A comprehensive analysis of empirical and calculated data on the levels of spectral ground motions accelerations (SA) at various fixed frequencies (f) in earthquakes of different intensities (I) and the construction of probabilistic models of the relationship between them in earthquakes of different magnitudes (M) and distances (D) on this basis. **Results.** For each of the 18 spectral components, logarithmically uniformly distributed over frequencies in the range 0.28–22 Hz, probabilistic estimates of SA were obtained for various combinations of M, D, and I. The corresponding probabilistic models SA(M,D,I,f) are constructed, through the analysis of which the frequencies and relevant levels of SA are identified, independent of M and D and determined only by the intensity I. These frequencies, which are different for each value of I, are called “responsible” for the macroseismic effect of this intensity. A method for determining the macroseismic intensity I from the SA(f) reaction spectrum is offered, which makes it possible to obtain more accurate estimates than traditional methods for estimating single oscillation parameters (amplitudes, periods, etc.).

**Keywords:** earthquakes; macroseismic earthquake intensity; ground motion response spectra; seismic hazard, seismic impacts.

**For citation:** Chernov Yu.K. Ground motion response spectra and macroseismic earthquake intensity: some statistical ratios. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2025. 15(4): 97–111. DOI: 10.46698/m0268-1908-8536-n

### Введение

В сейсмологии для оценки воздействия землетрясений на окружающую среду и общество используются характеристики двух видов. Первый – это «сила» или макросейсмическая интенсивность землетрясений, измеряемая в баллах макро-

сейсмической шкалы (см., например, [Медведев, 1962; 1968]). Второй – физические параметры движений грунта во время землетрясений, такие, как амплитуды, спектры, временные функции колебаний и др. (см., например, [Чернов, 1989]). Первые, известные еще с древних времен базируются на описании и последующем объединении разнообразных проявлений и эффектов землетрясений по степени их «силы» и опасности в отдельные группы, которым приписаны определенные количественные показатели – баллы соответствующим образом построенной шкалы. Вторые стали применяться значительно позже – после появления специальных сейсмических приборов, способных с необходимой для практических нужд точностью регистрировать физические характеристики движений грунта во время землетрясений. Этот второй способ оценки сейсмических воздействий имеет определенные преимущества, так как дает возможность получать данные, необходимые для проведения расчетов на сейсмостойкость и, вообще, на количественном уровне судить о геофизических процессах, происходящих во время землетрясений. Но и первый в определенной степени «описательный» вид оценок также не теряет актуальности. Так, например, согласно современным строительным нормативам, территория Российской Федерации по уровню сейсмической опасности разделена на зоны с различной макросейсмической интенсивностью (балльностью) сотрясений (см. [Комплект ..., 1999]). В то же время, основанные на этих данных расчеты на сейсмостойкость используют не сами макросейсмические баллы, а поставленные им в соответствие физические характеристики колебаний грунта – амплитуды и спектры реакции. В этих условиях вопрос адекватности этих соответствий имел и имеет первостепенное значение. Еще одна причина перманентной актуальности проводимых в данном направлении исследований – это то, что получаемые в их процессе данные являются одним из главных источников фундаментальных знаний о природе землетрясений и об их воздействии на окружающую среду и общество и, соответственно, одним из важных факторов, способствующих совершенствованию способов защиты от данного стихийного бедствия.

Исходя из вышеизложенного, многими исследователями в разное время рассматривались корреляции между наблюдаемыми макросейсмическими эффектами землетрясений и инструментально зарегистрированными параметрами движений грунта (см., например, [Медведев, 1962; Сейсмическая ..., 1975; Сейсмическое ..., 1977; Паутиан и др., 1989; Штейнберг и др., 1993; Atkinson, Sonley, 2000; Yaghmaei-Sabegh et al., 2011; Worden et al., 2012; Sokolov, 2013; Caprio et al., 2015; Nemati, 2015; Du et al., 2019; Заалишвили и др., 2024а,б]). Так, в работе [Чернов, 1989] исследовались статистические связи между амплитудами, периодами, длительностями, временем нарастания, спектрами, формой колебательных ускорений, скоростей и смещений грунта (как по отдельности, так и в разных сочетаниях) с одной стороны и балльностью сотрясений с другой. Полученные соотношения сравнивались между собой с целью выявления вариантов с наиболее тесной корреляцией. Было показано, что наиболее тесные связи наблюдаются между макросейсмическими интенсивностями сотрясений и уровнями спектральной плотности Фурье на отдельных частотах, своих для каждого уровня балльности. На основе этих закономерностей разработаны вероятностные модели для оценки макросейсмической балльности землетрясений по спектру Фурье колебаний грунта. Последующее применение этих моделей в различных сейсмоактивных районах мира с разными сейсмогеологическими условиями показало их эффективность.

Учитывая вышеописанный положительный опыт, представляется перспективным аналогичным образом рассмотреть вопрос о связи балльности сотрясений теперь уже со спектрами реакции колебаний грунта, которые в массовом порядке приводятся в современных мировых базах данных по сильным движениям. Вариант решения данной задачи приводится ниже.

### Информационная база и методика исследований

В основу исследования положены вероятностные оценки спектров реакции ускорений колебаний грунтов, которые можно ожидать при землетрясениях разных магнитуд ( $M$ ) и макросейсмических интенсивностей ( $I$ ). Для оценок спектров реакции использованы разработанные нами ранее и описанные в работе [Чернов, 2024a] вероятностные модели спектров Фурье ускорений колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разных магнитуд и расстояний до очага ( $D$ ). При этом оценки спектров реакции получались путем пересчета модельных оценок вышеуказанных спектров Фурье. Для пересчетов использовались соотношения между спектрами реакции ускорений колебаний грунта (с затуханием 5 %) и соответствующими спектрами Фурье из [Чернов, 2024б]:

$$\lg SA(f) = a (\lg |S|(f))^2 + b \lg |S|(f) + c \quad (1)$$

где:

$$a = 0,0720(\lg f)^5 - 0,1020(\lg f)^4 - 0,0718(\lg f)^3 + 0,0614(\lg f)^2 + 0,0469 \lg f + 0,0060$$

$$b = 0,4910(\lg f)^5 - 0,6323(\lg f)^4 - 0,0120(\lg f)^3 + 0,1827(\lg f)^2 + 0,0008 \lg f + 0,7992 \quad (2)$$

$$c = 0,2599(\lg f)^3 - 0,1285(\lg f)^2 + 0,6366 \lg f + 0,9868$$

В выражениях (1) и (2)  $|S|$  и  $SA$  – уровни спектральной плотности Фурье и уровни спектральных ускорений на различных частотах ( $f$ ) даны в см/с и см/с/с соответственно,  $f$  в Гц. Выражения (1) и (2) справедливы для  $f \approx 0,28-22$  Гц и  $|S| \approx 0,1-500$  см/с. Значения  $|S|(f)$  и производные от них  $SA(f)$ , также, как и используемые в работе пиковые ускорения PGA являются среднегеометрическими значениями между максимальными уровнями этих параметров на двух горизонтальных составляющих записи.

Для производства расчетов спектры Фурье и соответственно спектры реакции представлены в виде набора из 18-ти спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных по частотам в инженерном диапазоне 0,28–22 Гц. Непосредственно в результате расчетов сделаны оценки спектральной плотности Фурье и спектральных ускорений, выполненные для каждой из этих спектральных составляющих. Оценки спектров сделаны отдельно для каждой магнитуды землетрясения в диапазоне  $M=3-8$  и для таких расстояний до очага, на которых можно ожидать того или иного конкретного значения макросейсмической интенсивности землетрясения данной магнитуды в диапазоне  $I=3-9$  баллов MSK. Для определения этих расстояний использованы зависимости  $I(M, D)$  из [Чернов, 2024a]. Все оценки сделаны отдельно для «мягких» и «твердых» грунтов. В таблице 1 приведены принятые в настоящем исследовании оценки расстояний до очага, для которых рассчитаны спектры Фурье и соответствующие спектры реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях с разными  $M$  и  $I$ .

Таблица 1 / Table 1

**Оценки наиболее вероятных расстояний до очага (D), на которых с наибольшей вероятностью могут наблюдаться сотрясения различной интенсивности (балльности MSK) при землетрясениях магнитуд (M) в условиях «мягких» и «твердых» грунтов / Estimates of the most probable distances to the source (D), at which motions of varying intensity (MSK scores) are most likely to occur during earthquakes of magnitude (M) in conditions of “soft” and “hard” soils**

M	Грунт / The ground	D, км, km						
		9MSK	8MSK	7MSK	6MSK	5MSK	4MSK	3MSK
8	Мягк. / soft	31,6	49,0	114,8	169,8	229,1	354,8	530,9
	Тверд. / hard	7,9	30,2	62,4	100,0	179,1	173,8	375,8
7	Мягк. / soft	6,3	20,9	49,5	75,0	144,9	213,8	410,2
	Тверд. / hard	5,0	9,1	26,4	39,8	79,6	166,0	247,2
6	Мягк. / soft	3,2	5,9	6,2	30,0	63,5	112,2	188,4
	Тверд. / hard		3,2	3,2	16,3	33,5	63,4	101,2
5	Мягк. / soft		2,0	5,0	12,9	26,3	25,2	85,5
	Тверд. / hard			2,5	8,3	6,6	27,5	47,3
4	Мягк. / soft			1,3	4,0	10,0	18,7	26,6
	Тверд. / hard				2,0	6,3	10,7	20,0
3	Мягк. / soft					5,0	8,3	15,1
	Тверд. / hard					2,0	3,5	6,9
Среднегео- метрическое значение / The average metric value		7,6	10,1	11,3	21,5	26,3	44,6	81,5

В соответствии с используемыми в расчетах моделями принято, что оцениваемые уровни спектров реакции SA(M, D, f, I) являются случайными величинами, имеющими лог. нормальное распределение при всех рассматриваемых M, D, f и I. Оценивались наиболее вероятные значения и стандартные отклонения значений lgSA(M, D, f, I).

Дополнительно к вышеописанным прямым расчетным данным методом экстраполяции сделаны оценки SA(I, f) для I=10–12MSK.

## Результаты и обсуждения

На рисунке 1 приведены примеры полученных вероятных спектров реакции ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд, способных вызвать сотрясения с вероятной макросейсмической интенсивностью  $I=9\text{MSK}$ ,  $7\text{MSK}$  и  $5\text{MSK}$ .

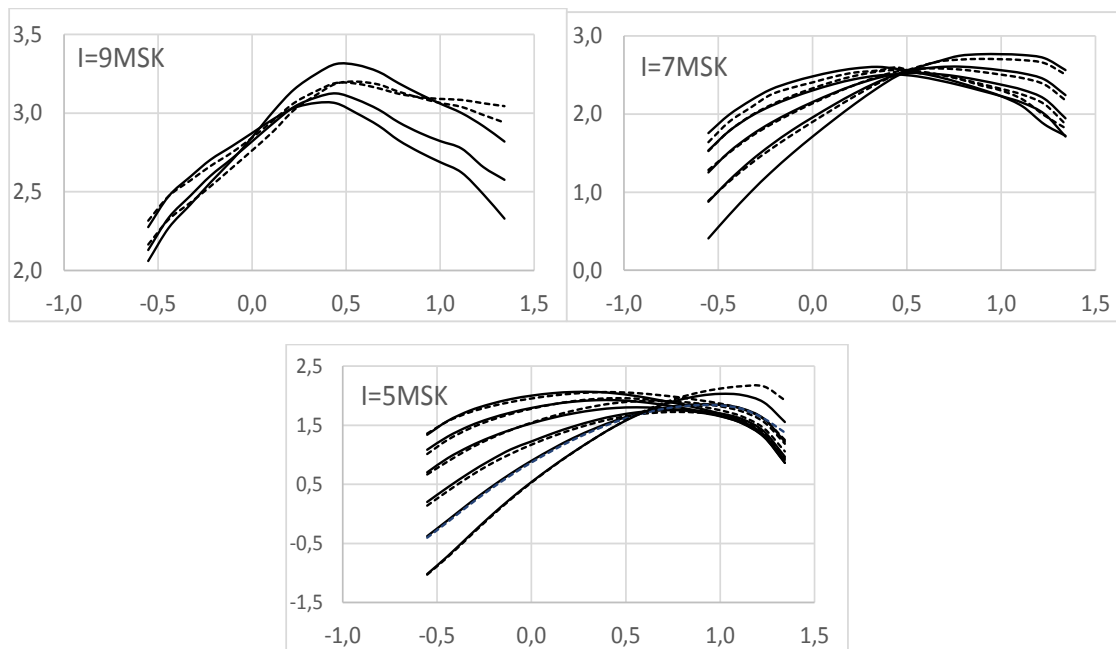


Рис. 1. Примеры наиболее вероятных значений логарифмов спектральных ускорений «мягких» (сплошные линии) и «твердых» (пунктир) грунтов для различных спектральных составляющих при землетрясениях разных магнитуд (цифры около кривых) и интенсивностей сотрясений.

Оси ординат – значения  $\lg SA$ , где  $SA$  в  $\text{cm/s/s}$ , а оси абсцисс –  $\lg f$ , где  $f$  в  $\text{Гц}$  /

Fig. 1. Examples of the most probable values of the logarithms of spectral accelerations of “soft” (solid lines) and “hard” (dotted lines) soils for various spectral components in earthquakes of different magnitudes (numbers near the curves) and earthquake intensities. The ordinate axes are  $\lg SA$  values, where  $SA$  is in  $\text{cm/s/s}$ , and the abscissa axes are  $\lg f$ , where  $f$  is in  $\text{Hz}$

Аналогичные построения сделаны и для землетрясений с макросейсмической балльностью  $I=8\text{MSK}$ ,  $6\text{MSK}$ ,  $4\text{MSK}$  и  $3\text{MSK}$ . При этом в соответствии с используемыми зависимостями  $I(M, D)$  и данными таблицы 1 принято: интенсивность землетрясений  $I=9$  баллов  $\text{MSK}$  может наблюдаться при магнитудах  $M=8$ ,  $7$  и  $6$  в условиях «мягких» грунтов и  $M=8$  и  $7$  в условиях «твердых» грунтов;  $I=8\text{MSK}$  при  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$  и  $5$  для «мягких» грунтов и  $M=8$ ,  $7$  и  $6$  для «твердых» грунтов;  $I=7\text{MSK}$  при  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$  и  $4$  для «мягких» грунтов и  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$  и  $5$  для «твердых» грунтов;  $I=6\text{MSK}$  при  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$ ,  $4$  и  $3$  для «мягких» грунтов и  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$  и  $4$  для «твердых» грунтов;  $I=5\text{MSK}$  при  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$ ,  $4$  и  $3$  для «мягких» грунтов и  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$  и  $4$  для «твердых» грунтов;  $I=4\text{MSK}$  и  $I=3\text{MSK}$  при  $M=8$ ,  $7$ ,  $6$ ,  $5$ ,  $4$  и  $3$  для «мягких» и «твердых» грунтов.

Графики спектров на рисунке 1 и оценки, полученные для других интенсивностей сотрясений, показывают, что в общем спектре колебаний существуют частоты, свои для каждого уровня балльности, на которых интенсивности спектральных ускорений при землетрясениях разных магнитуд резко сближаются и их разброс становится существенно меньшим, чем на остальных частотах. Поскольку имен-

но эти частоты значительно теснее других связаны с интенсивностями сотрясений, то, по аналогии с подобными исследованиями в отношении спектра Фурье (см. [Чернов, 1989]), в данном исследовании они также названы «ответственными» за макросейсмический эффект данной силы ( $I=i$ ) –  $f_i$ . «Ответственные» частоты возрастают при уменьшении макросейсмической интенсивности  $I$ .

В численном выражении значения  $f_i$  приведены в таблице 2. В этой же таблице даны наиболее вероятные значения уровней спектральных ускорений колебаний грунта при землетрясениях разных  $M$ , соответствующих данной интенсивности сотрясений –  $SA_{fi}$ . В таблице 2 приводятся и другие характеристики, рассчитанные как наиболее вероятные значения для совокупностей спектров реакции при землетрясениях разных  $M$ , соответствующих разным фиксированным значениям  $I$ . Это максимальные спектральные ускорения ( $SA_{max}$ ) и частоты, на которых наблюдаются  $SA_{max} - f_{SA_{max}}$ . Для дальнейшего анализа в эту же таблицу включены и оценки вероятных пиковых ускорений (PGA), из [Опасные ..., 2022], ранее полученные нами обобщением 25-ти известных в мире зависимостей  $PGA(I)$ , а также соотношения  $SA_{max}/PGA$ . Здесь же приведены результаты выполненных с использованием выражений (1) и (2) пересчетов величин  $SA_{fi}$  в спектральные плотности Фурье ( $lg|S|_{fi}^*$ ), а также наши аналогичные по смыслу оценки ( $lg|S|_{fi}$ ), выполненные ранее путем прямых сопоставлений эмпирических данных о спектрах Фурье и соответствующих балльности сотрясений (см. выше).

Таблица 2 / Table 2

**Осредненные характеристики совокупностей спектров реакции ускорений «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд, соответствующих разным интенсивностям сотрясений и аналогичные оценки пиковых амплитуд и спектральных плотностей ускорений колебаний грунта.**

**$SA_{max}$ ,  $SA_{fi}$  и PGA в см/с/с,  $|S|_{fi}^*$  и  $|S|_{fi}$  в см/с,  $f_i$  и  $f_{SA_{max}}$  в Гц /  
Averaged characteristics of the totality of the acceleration response spectra of “soft” and “hard” soils in earthquakes of different magnitudes corresponding to different earthquake intensities and similar estimates of peak amplitudes and spectral densities of ground motion accelerations.  $SA_{max}$ ,  $SA_{fi}$  and PGA in cm/s/s,  $|S|_{fi}^*$  and  $|S|_{fi}$  in cm/s,  $f_i$  and  $f_{SA_{max}}$  in Hz**

Характеристики спектров и амплитуд колебаний грунта / Characteristics of ground motion spectra and amplitudes	Макросейсмическая интенсивность сотрясений / Macroseismic intensity of shaking						
	9MSK	8MSK	7MSK	6MSK	5MSK	4MSK	3MSK
$SA_{fi}$	676	501	339	159	70	35	18
$f_i$	1,0	1,67	3,6	4,7	6	7,8	10
$SA_{max}$	1500	700	357	159	70	36	18
$f_{SA_{max}}$	2,8	3,6	3,6	4,7	6	7,8	7,8
$lg S _{fi}^*$	2,267	1,872	1,371	0,905	0,394	-0,118	-0,612
$lg S _{fi}$	2,250	1,860	1,360	0,930	0,460	-0,140	-0,660
PGA	593	285	132	58,2	25,2	12,3	5,6
$SA_{max}/PGA$	2,53	2,46	2,70	2,73	2,78	2,93	3,21

В графическом виде вышесказанное демонстрируется рисунками 2 и 3.

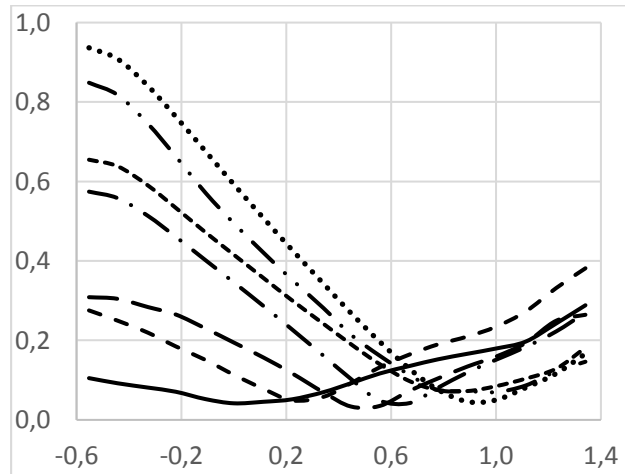


Рис. 2. Стандартные отклонения наиболее вероятных значений  $\lg SA$  (ось ординат) в зависимости от логарифма частоты спектральной составляющей (ось абсцисс), рассчитанные по совокупностям спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд ( $M$ ), отнесенных к разным интенсивностям сотрясений ( $I$ ). Сплошная линия, средний пунктир, длинный пунктир, пунктир с точкой, короткий пунктир, пунктир с двумя точками и точечная линия – оценки для землетрясений с  $I = 9, 8, 7, 6, 5, 4$  и 3 баллов MSK соответственно /

Fig. 2. The standard deviations of the most probable  $\lg SA$  values (ordinate axis) as a function of the logarithm of the frequency of the spectral component (abscissa axis), calculated from the totality of the motion spectra of “soft” and “hard” soils in earthquakes of different magnitudes ( $M$ ), related to different earthquake intensities ( $I$ ). Solid line, medium dotted line, long dotted line, dotted line with a stipple, short dotted line, dotted line with two stipples and stipple line – estimates for earthquakes with  $I = 9, 8, 7, 6, 5, 4$  and 3 MSK points, respectively

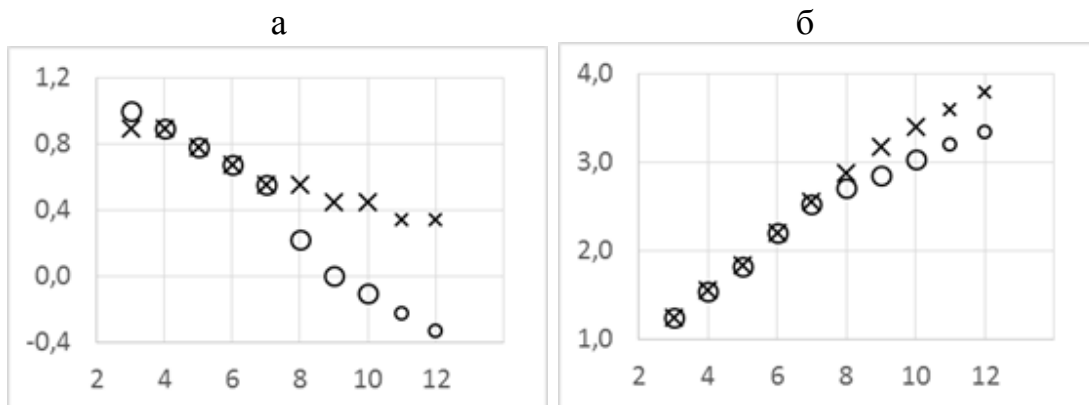


Рис. 3. Характеристики спектров реакции колебаний грунта при землетрясениях разных интенсивностей ( $I$ ): а –  $f_i$  (кружки) и  $f_{SA_{max}}$  (крестики); б –  $SA_{fi}$  (кружки) и  $SA_{max}$  (крестики).

Оси ординат – логарифмы сравниваемых параметров, где частоты в Гц, спектральные ускорения в см/с/с. Оси абсцисс – IMSK. Большие и малые значки – оценки по данным из таблицы 2 и экстраполяции соответственно /

Fig. 3. Characteristics of the response spectra of ground motions during earthquakes of different intensities ( $I$ ): а –  $f_i$  (circles) and  $f_{SA_{max}}$  (crosses); б –  $SA_{fi}$  (circles) and  $SA_{max}$  (crosses). The ordinate axes are the logarithms of the compared parameters, where the frequencies are in Hz and the spectral accelerations are in cm/s/s. The abscissa axes – IMSK. The large and small icons are estimates based on data from Table 2 and extrapolation, respectively

Тестирование параметров разработанных моделей  $SA(f, I)$  на внутреннюю и внешнюю согласованность свидетельствует об их реалистичности и надежности. Так, приведенные в таблице 2 и на рисунке 4 модельные оценки  $SA_{max}/PGA$  настоящего исследования близки к аналогичным эмпирическим оценкам из [Чернов, 2024б]. Значения «ответственных» частот для спектров реакции и для спектров Фурье (см. [Чернов, 1989; 2024а]) практически совпадают. Модельные ( $|S|_{fi}^*$ ) и эмпирические ( $|S|_{fi}$ ) оценки также близки. Коэффициент регрессии  $\lg|S|_{fi}^*$  на  $\lg|S|_{fi}$  равный 0,9902 и достоверность соответствующей линейной аппроксимации равная 0,9963 также говорят об их статистическом совпадении.

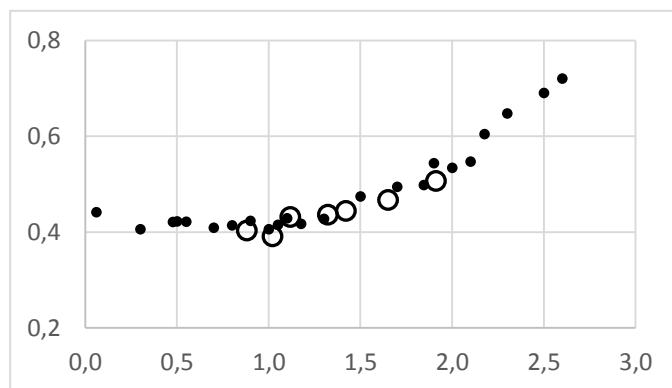


Рис. 4. Сравнение модельных оценок соотношений  $SA_{max}/PGA$  настоящего исследования (большие пустые кружки) и эмпирических оценок из [Чернов, 2024б] (малые залитые кружки), рассчитанных для разных расстояний до очага ( $D$ ). Ось абсцисс –  $\lg D$ , где  $D$  в км; ось ординат –  $\lg(SA_{max}/PGA)$  /

Fig. 4. Comparison of model estimates of the  $SA_{max}/PGA$  ratios of the present study (large empty circles) and empirical estimates from [Chernov, 2024b] (small filled circles) calculated for different distances to the source ( $D$ ). The abscissa axis is  $\lg D$ , where  $D$  is in km; the ordinate axis is  $\lg(SA_{max}/PGA)$

Таким образом, описанная выше вероятностная зависимость  $I$  от  $SA_{fi}$  обладает подходящими качествами для того, чтобы на ее основе производить оценки макросейсмической интенсивности землетрясений по спектрам реакции колебаний грунта. Для реализации этой возможности разработана соответствующая расчетная модель – функция распределения вероятностей. При построении модели принято, что макросейсмический эффект землетрясения формируется главным образом колебаниями грунта на частотах  $f_i$  и вкладом остальных частот спектра можно пренебречь. Тогда для непревышения балльности ( $I=i$ ) необходимо условие, чтобы наблюдаемые спектральные ускорения на частоте  $f_i$  не превышали уровня приписанного этой балльности ( $SA_{fi}$ ). Это условие необходимое, но недостаточное. Можно показать, что необходимым и достаточным условием непревышения балльности  $I=i$  является условие непревышения наблюдаемым спектром реакции на частоте  $f_i$  уровня  $SA_{fi}$ , а также уровней спектральных ускорений, приписанных сотрясениям большей силы ( $I=j>i$ ) на других частотах, «ответственных» за макросейсмический эффект  $I=j>i$ .

Таким образом, случайное событие – непревышение интенсивности сотрясений  $I=i$  равнозначно совмещению случайных событий: непревышению отдельными спектральными составляющими уровней  $SA$ , приписанных макросейсмической интенсивности  $I=i, i+1, i+2, \dots, i+12$ . В этом случае функция распределения может быть представлена в виде:

$$P[I \leq i] = \prod_{j=i}^{12} \left(1 - \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \int_{x_{\min}}^{x_j} e^{-\frac{(x-a_j)^2}{2\sigma_j^2}} dx\right) \quad (3)$$

Здесь  $a_j$  и  $\sigma_j$  – среднее значение (математическое ожидание) и стандарт величины  $x = \lg SA_{fi}$ ;  $x_j$  – значение логарифма наблюдаемых спектральных ускорений на частоте  $f_j$ ;  $x_{\min}$  – достаточно малая величина.

Для проверки эффективности предложенной модели, с применением выражения (3), произведены расчёты вероятной балльности сотрясений для выборки из 136 событий (землетрясений) в диапазоне  $M=7,7-2,5$ ,  $D=5-250$  км и  $I=10-3$  MSK, для которых имелись спектры реакции ускорений и пиковые ускорения, инструментально зарегистрированные на обеих горизонтальных составляющих записи в сочетании с реально наблюдаемой макросейсмической интенсивностью сотрясений. Используемые в расчетах значения  $SA_{fi}$  приведены в таблице 2. Значения стандартных отклонений с учетом данных из [Чернов, 2024а,б] для всех значений  $\lg SA_{fi}$  приняты равными 0,20.

На рисунке 5 в графическом виде приведены результаты теста, заключающегося в сопоставлении реально наблюдаемых интенсивностей сотрясений ( $I_{\text{наб}}$ ) и полученных с помощью выражения (3) расчетных оценок наиболее вероятных значений балльности ( $I_{SA}$ ). Для сравнения здесь также даны оценки интенсивностей сотрясений ( $I_{PGA}$ ), полученные пересчетом реально зарегистрированных уровней PGA с использованием упомянутых выше традиционных соотношений  $I(PGA)$ .

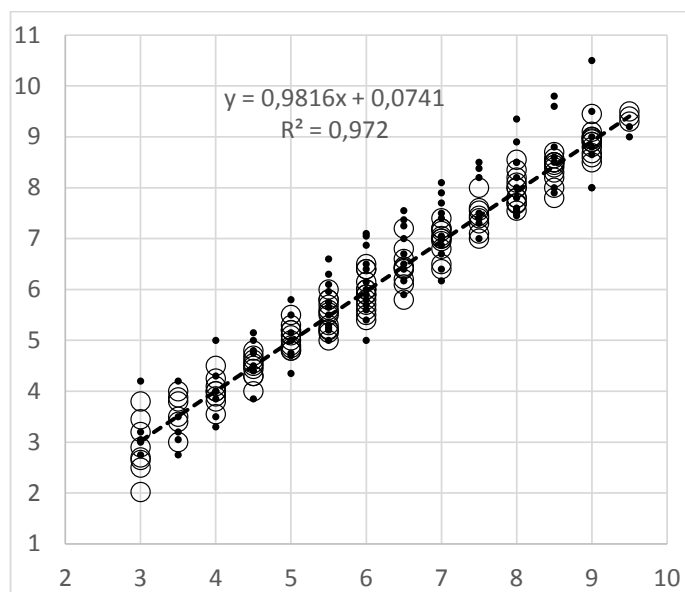


Рис. 5. Сопоставление реально наблюдаемых интенсивностей сотрясений ( $I_{\text{наб}}$ ) с расчетными оценками  $I_{SA}$  (большие пустые кружки) и  $I_{PGA}$  (малые залитые кружки) (пояснения в тексте).

Пунктир – график регрессии  $I_{SA}$  на  $I_{\text{наб}}$  (аналитическое выражение на поле рисунка).

Ось абсцисс –  $I_{\text{наб}}$  в баллах MSK, ось ординат –  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  в баллах MSK /

Fig. 5. Comparison of the observed in reality motions intensities ( $I_{\text{obs}}$ ) with the calculated estimates of  $I_{SA}$  (large empty circles) and  $I_{PGA}$  (small filled circles) (explanations in the text). The dotted line is the  $I_{SA}$  regression graph for  $I_{\text{obs}}$  (analytical expression in the field of the figure). The abscissa axis is  $I_{\text{obs}}$  in MSK scores, the ordinate axis is  $I_{SA}$  and  $I_{PGA}$  in MSK scores

Данные рисунка 5 (включающие, в том числе, близкий к единице коэффициент регрессии  $I_{SA}$  на  $I_{\text{наб}}$ , степень достоверности аппроксимации и тесноту связи) сви-

детельствуют о высокой степени соответствия модельных определений реальным наблюдениям. На рисунке также видно, что оценки  $I_{PGA}$  по точности значительно уступают определениям  $I_{SA}$ . Это наглядно иллюстрирует рисунок 6, где приводятся стандартные отклонения индивидуальных оценок  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  (рис. 5), отнесенных к различным уровням  $I_{наб}$ . Так, например, видно, что стандартные отклонения оценок  $I_{PGA}$  в среднем в 1,76 раза выше, чем аналогичный показатель для  $I_{SA}$ .

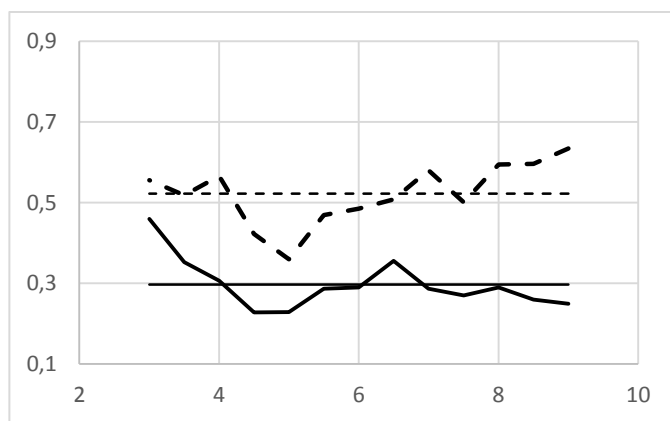


Рис. 6. Стандартные отклонения расчетных значений  $I_{SA}$  (сплошные линии) и  $I_{PGA}$  (пунктир) относительно разных уровней интенсивности сотрясений при реальных землетрясениях ( $I_{наб}$ ). Толстые ломаные линии – оценки для отдельных значений  $I_{наб}$ , тонкие прямые линии – средние значения по всему диапазону  $I_{наб}$ . Ось абсцисс – интенсивности  $I_{наб}$  в баллах MSK; ось ординат – стандартные отклонения  $I_{SA}$  и  $I_{PGA}$  в баллах MSK.

Fig. 6. Standard deviations of the calculated  $I_{SA}$  (solid lines) and  $I_{PGA}$  (dotted line) values relative to different levels of earthquake intensity in real earthquakes ( $I_{obs}$ ). Thick broken lines are estimates for individual  $I_{obs}$  values, thin straight lines are averages over the entire  $I_{obs}$  range, the abscissa axis is the intensity of  $I_{obs}$  in MSK scores; the ordinate axis is the standard deviations of  $I_{SA}$  and  $I_{PGA}$  in MSK scores.

Принимая во внимание, что статистические соотношения  $SA_{ff}(I)$  оказались близкими к аналогичным оценкам, для спектров Фурье, сделано предположение, что для обоих этих случаев применима общая физическая интерпретация. Подробное ее описание дано в [Чернов, 1989]. Здесь приведем основные тезисы.

В шкале MSK, как и в большинстве других шкал сейсмической интенсивности используются три группы макросейсмических признаков, характеризующие сейсмические движения разной природы и масштаба. Первая группа, связанная с сотрясениями небольшой интенсивности (2–5 баллов), включает в основном реакцию людей, поведение относительно небольших предметов, различные мелкие повреждения. Такие признаки характерны для короткопериодных сейсмических воздействий. Во второй группе признаков (интенсивность сотрясений 6–9 баллов) в основном используются реакции более крупных объектов (зданий, сооружений и их отдельных частей), которые уже не могут происходить без участия более длиннопериодных колебаний. Самые же сильные макросейсмические эффекты – перемещения геоморфологических элементов, образование крупных обвалов, разрывов и т.п. (третья группа признаков), сопровождающие сотрясения силой более 9 баллов – невозможны без участия ещё более низкочастотных сейсмических воздействий. То есть наблюдаемое в наших опытах понижение «ответственных» частот при росте  $I$  объясняется устройством самих макросейсмических шкал. Таким образом, разные уровни интенсивности землетрясений (как их определяют макросейсмические

шкалы) порождаются сейсмическими движениями разного масштаба (точнее разными пропорциями этих движений).

Аналогичная логика применима и к землетрясениям, относящимся к средней, наиболее важной с практической точки зрения, части макросейсмических шкал ( $I=6-9$ MSK). Наблюдаемое здесь снижение  $f_i$  при росте  $I$  также можно связать с реакцией объектов (зданий и сооружений), служащей индикатором той или иной интенсивности сотрясений. Так, например, при 6-балльных землетрясениях обычно наблюдаются повреждения мелких деталей (трещины в углах, простенках и т.п.), которые могут быть вызваны короткопериодными колебаниями. При более сильных 7–8-балльных землетрясениях вероятны более крупные повреждения – обрушение стен, перекрытий и т.д., связанные (при условии параллельной «подготовки» объекта более высокочастотными составляющими общего спектра колебаний) с более длиннопериодными воздействиями достаточной интенсивности. При еще более сильных землетрясениях происходит полное разрушение конструкций под воздействием кроме уже упомянутых высокочастотных и среднечастотных сейсмических колебаний еще и достигших достаточной интенсивности более длиннопериодных движений.

Описанная схема нарастания макросейсмического эффекта не противоречит излагаемым нами ранее представлениям об изменении свойств (например, увеличении периодов собственных колебаний) самих подвергающихся сейсмическим воздействиям объектов. Такие изменения происходят из-за того, что в изначально «целом» здании или сооружении, обладающем преимущественно свойствами упругого тела, по мере возрастания сейсмических нагрузок, появляются сначала небольшие, а потом все возрастающие дефекты, из-за чего деформации объекта становятся все больше не пропорциональными напряжениям – появляются «пластические шарниры». В этих шарнирах для дальнейшего накопления деформаций (т.е. макросейсмических дефектов более высокого уровня) уже недостаточно просто повышать напряжения (ускорения), а нужно также «закачивать» в них все больше энергии, т.е. повышать скорости колебаний. А интенсивные скорости сейсмических колебаний грунта при землетрясениях, как известно, имеют более длительные периоды, чем интенсивные ускорения.

Таким образом, повышение уровня макросейсмических эффектов можно представить как сочетание роста макросейсмических дефектов одного (более низкого) масштабного уровня, происходящего под воздействием возрастающей интенсивности относительно высокочастотных колебаний, и последующего перехода на другой (более высокий) масштабный уровень макросейсмических дефектов под воздействием достигших достаточной интенсивности относительно низкочастотных колебаний.

Наряду с описанным сходством, модели  $SA(f, I)$  и  $|S|(f, I)$  имеют и существенные отличия. Так (см. табл. 2 и рис. 3) при  $I=3-7$ MSK значения  $f_i$  и  $f_{SA_{max}}$ , а также соответствующие этим частотам уровни  $SA_{fi}$  и  $SA_{max}$  практически совпадают. При  $I>7$ MSK по мере роста  $I$  частоты  $f_{SA_{max}}$  начинают все больше превышать частоты  $f_i$ . Также ведут себя и уровни спектров  $SA_{max}$  по отношению к  $SA_{fi}$ . Частоты же, на которых наблюдаются максимальные уровни спектральной плотности Фурье, наоборот, близки к «ответственным» частотам при  $I>7$ MSK. По мере же уменьшения  $I$  эти частоты все больше расходятся (в сторону уменьшения) с «ответственными» частотами и при  $I=3$ MSK становятся примерно в 2,5 раза меньшими, чем соответствующие значения  $f_i$ . При интенсивностях  $I>7$ MSK максимальные уровни

$|S|$  ( $|S|_{\max}$ ) в отличие от уровней  $SA_{\max}$  близки к значениям  $|S|$  на «ответственных» частотах ( $|S|_{fi}$ ). При  $I \leq 7$  MSK по мере уменьшения  $I$  уровни  $|S|_{\max}$  также в отличие от значений  $SA_{\max}$  начинают все больше отличаться (в сторону увеличения) от уровней  $|S|_{fi}$  и при  $I=3$  MSK становятся примерно в 2,5 раза большими, чем соответствующие значения  $|S|_{fi}$ .

Оценивая результаты настоящего исследования с практической точки зрения следует обратить внимание также и на то, что спектры ускорений реакции колебаний грунта при одних и тех же значениях балльности сотрясений в зависимости от  $M$  и  $D$  могут иметь существенно разную форму и разные уровни  $SA(f)$ . Форма спектров зависит также и от уровня  $I$ . Эти вариации уровней спектральных ускорений могут достигать нескольких сотен и более процентов (см. рис. 1 и табл. 2). В то же время в российских строительных нормативах, а также в нормативах некоторых других стран для расчетов на сейсмостойкость используются спектры реакции (произведения нормативных или эффективных ускорений на коэффициенты динамичности) форма которых стандартна и одинакова для всех уровней  $I$  (есть только небольшое различие формы для разных типов грунтов). Очевидно, что расчеты, основанные на таких нормативных спектрах, могут содержать значительные ошибки.

### Выводы

1. В общем спектре реакции колебаний грунта существуют «ответственные» частоты, не зависящие от  $M$  и  $D$  и свои для каждого уровня  $I$ , на которых значения  $SA$  значительно более тесно связаны с  $I$ , чем спектральные ускорения на других частотах.

2. Разработанная на основе установленных статистических соотношений между  $SA(f)$  и  $I$  модель (функция распределения вероятностей) позволяет оценивать макросейсмическую балльность землетрясений по спектру реакции более точно, чем с помощью других традиционно используемых для этих целей параметров колебаний грунта.

3. Установленная значительная вариабельность спектров реакции колебаний грунта при одной и той же балльности сотрясений ставит вопрос о совершенствовании отечественных строительных нормативов в данном направлении.

### Литература

1. 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. – 2024а. – Т. 14. № 1. – С. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002.

2. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных. // Геология и Геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 2. – С. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004.

3. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / Гл. редакторы В.Н. Страхов, В.И. Уломов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.

4. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат. 1962. – 284 с.

5. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности. // Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1968. – С. 158–162.

6. Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: коллективная монография. / Труды VIII Международной конференции. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, 2022. – 477 с.
7. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Доцев Н.Т., Саргсян Н.М. Макросейсмическая магнитуда. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1989. – Вып. 30. «Оценка эффекта сильных землетрясений». – С. 98–110.
8. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. – 279 с.
9. Сейсмическое микрорайонирование. / Отв. редактор С.В. Медведев. – М.: Наука, 1977. – 248 с.
10. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. Ташкент: ФАН», 1989. – 295 с.
11. Чернов Ю.К. Эмпирические модели для вероятностных оценок спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. № 2. – С. 90–106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007.
12. Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 4. – С. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010.
13. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1993. – Вып. 34. – С. 5–94.
14. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical relationships between modified Mercalli intensity, and response spectra. // BSSA. – 2000. – Vol. 90(2). – pp. 533–544.
15. Caprio M., Tarigan B., Worden B., Wiemer S, Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A Global relationship and evaluation of regional dependency. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2015. – Vol. 105. No. 3. – pp. 1476–1490. DOI: 10.1785/0120140286.
16. Du K., Ding B., Luo H., Sun J. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and macroseismic intensity in Western China. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2019. – Vol. 109. No. 1. – pp. 284–297. DOI: 10.1785/0120180216.
17. Nemati M. Relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground-motion of the earthquakes in Persia. // Journal of Earthquake Engineering. – 2015. DOI: 10.1080/13632469.2015.1104751.
18. Sokolov V. Three techniques for estimation of Instrumental Intensity: a comparison. // In: Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13). 2013. Jeju, Korea, pp. 574–591.
19. Worden C.B., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A., Wald D.J. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2012. – Vol. 102. No. 1. – pp. 204–221.
20. Yaghmaei-Sabegh S., Tsang H.H., Lam N.T.K. Conversion between peak ground motion parameters and modified Mercalli intensity values. // Journal of Earthquake Engineering. – 2011. – Vol. 15. No. 7. – pp. 1138–1155.

## References

1. 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. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024а. Vol. 14. No. 1. pp. 19–35. DOI: 10.46698/VNC.2024.82.41.002. (In Russ.)
2. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geocological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024b. Vol. 14. No. 2. pp. 45–60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004. (In Russ.)
3. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake-prone areas. Eds. V.N.

- Strakhov, V.I. Ulomov. Moscow. OIPE RAS. 1999. 57 p. (In Russ.)
4. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (In Russ.)
  5. Medvedev S.V. International scale of seismic intensity. Seismic zoning of the territory of the USSR. Moscow. Nauka. 1968. pp. 158–162. (In Russ.)
  6. Hazardous natural and anthropogenic processes in mountainous regions: models, systems, technologies: collective monograph. In Proc. of the VIII Int. Conf. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2022. 477 p. (In Russ.)
  7. Rautian T.G., Khalturin V.I., Dotsev N.T., Sargsyan N.M. Macroseismic magnitude. Problems of Engineering Seismology. 1989. Issue 30. Assessment of the effect of strong earthquakes. pp. 98–110. (In Russ.)
  8. Seismic scale and methods of measuring seismic intensity. Moscow. Nauka. 1975. 279 p. (In Russ.)
  9. Seismic microzonation. Ed. S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (In Russ.)
  10. Chernov Yu.K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of the territory. Tashkent. Fan. 1989. 295 p. (In Russ.)
  11. Chernov Yu.K. Empirical models for probabilistic estimates of the vibration spectra of “soft” and “hard” soils during earthquakes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024a. Vol. 14. No. 2. pp. 90–106. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.64.007. (In Russ.)
  12. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. Geology and Geophysics of Russian South. 2024b. Vol. 14. No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)
  13. Shteinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods of seismic impact assessment (manual). Problems of Engineering Seismology. 1993. Issue 34. pp. 5–94. (In Russ.)
  14. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical relationships between modified Mercalli intensity, and response spectra. BSSA. 2000. Vol. 90(2). pp. 533–544.
  15. Caprio M., Tarigan B., Worden B, Wiemer S, Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICES): A Global relationship and evaluation of regional dependency. Bulletin of the Seismological Society of America. 2015. Vol. 105. No. 3. pp. 1476–1490. DOI: 10.1785/0120140286.
  16. Du K., Ding B., Luo H., Sun J. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and macroseismic intensity in Western China. Bulletin of the Seismological Society of America. 2019. Vol. 109. No. 1. pp. 284–297. DOI: 10.1785/0120180216.
  17. Nemati M. Relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground-motion of the earthquakes in Persia. Journal of Earthquake Engineering. 2015. DOI: 10.1080/13632469.2015.1104751.
  18. Sokolov V. Three techniques for estimation of Instrumental Intensity: a comparison. In: Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13). 2013. Jeju. Korea. pp. 574–591.
  19. Worden C.B., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A., Wald D.J. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. Bulletin of the Seismological Society of America. 2012. Vol. 102. No. 1. pp. 204–221.
  20. Yaghmaei-Sabegh S., Tsang H.H., Lam N.T.K. Conversion between peak ground motion parameters and modified Mercalli intensity values. Journal of Earthquake Engineering. 2011. Vol. 15. No. 7. pp. 1138–1155.