

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.3

DOI: [10.46698/VNC.2023.17.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.17.83.005)

Оригинальная статья

## Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи

**М.И. Фидарова** , **В.Б. Заалишвили** , **Д.А. Мельков** 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 01.02.2023, доработана: 03.03.2023, одобрена в печать: 09.03.2023

**Резюме: Актуальность работы.** Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интенсивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. Но движение грунта, вызванное землетрясением, является сложным, и для количественного отражения характеристик движения грунта предложен целый ряд параметров. В настоящее время нет общепризнанного мнения, какая из характеристик наилучшим образом описывает макросейсмическую интенсивность. **Целью** работы является сопоставление имеющихся интегральных характеристик инструментальной интенсивности и различных комбинаций параметров с сейсмической интенсивностью по данным сети K-net. **Методы работы.** В соответствии с поставленной задачей необходимо использовать интерпретируемую модель, которой является регрессия. Использовался метод опорных векторов. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки). **Результаты работы.** В результате установлено наилучшее соответствие макросейсмической интенсивности пиковых горизонтальных скоростей ( $R^2=0,76$ . MAE=0,29). Введение дополнительного параметра позволяет повысить  $R^2$  до 0,8–0,85 и снизить MAE до 0,22–0,27. Метрики оценены по тестовой выборке. Наилучшие показатели достигаются для модели с комбинацией среднеквадратической скорости и меры Фаджфара. Учитывая, что мера Фаджфара представляет собой произведение пиковой скорости на корень четвертой степени из продолжительности новый параметр можно рассматривать как модифицированную меру Фаджфара.

**Ключевые слова:** сейсмическая интенсивность, инструментальные параметры, базы данных сильных движений.

**Для цитирования:** 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. 13(1): 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

## GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.17.83.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.17.83.005)

Original paper

# Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum

M.I. Fidarova , V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov 

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

Received: 01.02.2023, revised: 03.03.2023, accepted: 09.03.2023

**Abstract: Relevance.** As an objective characteristic of the released seismic energy, the value of macroseismic intensity should be related to the instrumental parameters of seismic vibrations. Traditionally, seismic impacts in the practice of earthquake-engineering are estimated by peak values of horizontal ground acceleration. Earthquake-induced ground motion is complex, and a number of another parameters have been proposed to quantify ground motion characteristics. At present, there is no generally accepted opinion which of the characteristics describes the macroseismic intensity in the best manner. **The aim** of this work is to compare the available integral characteristics of instrumental intensity and various combinations of parameters with seismic intensity according to K-net network data. **Methods.** In accordance with the task, it is necessary to use an interpretable model, which is regression. The support vector machine was used. To evaluate the effectiveness of models with the most uniform use of available data, a cross-validation procedure was used. **Results.** As a result, the best correspondence to the macroseismic innessivity of the peak horizontal velocity was established ( $R^2 = 0.76$ , MAE = 0.29). The introduction of an additional parameter allows increasing  $R^2$  to 0.8-0.85 and reducing MAE to 0.22-0.27. The metrics are estimated from the test set. The best performance is achieved for the model with the combination of root mean square velocity and the Fajfar measure. Considering that the Fajfar measure is the product of the peak horizontal velocity and the fourth root of the duration, the new parameter can be considered as a modified Fajfar measure.

**Keywords:** seismic intensity, instrumental parameters, strong motion databases.

**For citation:** Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the magnitude of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of fluctuations in the soil stratum. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(1): 59-75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

## Введение

Макросейсмическая интенсивность представляет собой локальную меру степени ущерба от землетрясения и сотрясения грунта при землетрясении, о чем свидетельствуют наблюдаемые повреждения и реакция различных элементов и человека. Инструментальные оценки интенсивности, основанные на зависимости между сейсмической интенсивностью и инструментальными измерениями, широко используются в различных областях инженерной сейсмологии и управления сейсмическими рисками [Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Sokolov, Furumura, 2008; Zhang et al., 2012; Zaalishvili et al., 2014a, b, 2016, 2020; Koliopoulos et al., 1998; Габеева, Бурдзиева, 2008; Заалишвили, 2009; Курбанов и др., 2022]. Кроме того, макросейсмическая интенсивность по-прежнему часто яв-

ляется единственным наблюдаемым параметром для количественной оценки уровня серьезности колебаний грунта во многих городах, где нет сейсмометрических инструментов. Кроме того, макросейсмическая интенсивность является единственной доступной мерой интенсивности доинструментальных исторических землетрясений [Masi et al., 2020].

Являясь объективной характеристикой выделенной сейсмической энергии величина макросейсмической интенсивности должна иметь связь с инструментальными параметрами сейсмических колебаний. Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. Такой подход, являясь простым и удобным для практического использования, отражен в строительных нормах для сейсмостойкого проектирования и строительства в сейсмически опасных районах большинства стран мира. Но движение грунта, вызванное землетрясением, является сложным, и для количественного отражения характеристик движения грунта может использоваться несколько параметров, а не один. Амплитуда, частотный состав и продолжительность являются наиболее важными характеристиками в воззрениях инженерного сообщества [Kramer, 1996; Karimzadeh, Askan, 2021]. Повышение надежности расчетов возможно только путем задания сейсмических воздействий в энергетических характеристиках колебаний грунта [Аптикаев, 2021].

Поэтому различными авторами было предложено большое количество различных параметров, которые можно разделить на следующие категории: – амплитудные: максимальные скорости (PHV), смещения (PHD) и ускорения (PHA), среднеквадратическое ускорение (RMS); – спектральные параметры: частота максимума спектра Фурье ( $f_{max}$ ), средневзвешенная частота ( $f_{aw}$ ); – энергетические параметры, такие как площадь спектра (Sr), кумулятивная абсолютная скорость (CAV), кумулятивный квадрат ускорений (интенсивность Ариаса), индекс полной входной энергии ( $E_r$ ), продолжительность колебаний (Duration), которая также может определяться различными способами и производные от данных параметров – например мера Фаджфара (Fajfar), площадь нормированного спектра ( $S_r$ ), а также параметры спектра реакции – интенсивность Хаузнера (Hausner intensity). Описание всех признаков и соответствующие формулы приведены в предыдущей работе [Заалишвили и др., 2022].

Цель данной работы состоит в сопоставлении имеющихся интегральных параметров инструментальной интенсивности и их различных комбинаций по данным сети K-net и установление как статистических, так и физических обоснований. В соответствии с этим необходимо использовать интерпретируемую модель, которой является регрессия.

### Метод опорных векторов

Метод опорных векторов (support vector), называемый ранее алгоритмом «обобщенного портрета», был разработан советскими математиками В.Н. Вапником и А.Я. Червоненкисом (1974) и с тех пор приобрел широкую популярность. Основная идея классификатора на опорных векторах заключается в том, чтобы строить разделяющую поверхность с использованием только небольшого подмножества точек, лежащих в зоне, критической для разделения. Данный метод может быть эффективно использован для решения задач регрессии [Smola, Schölkopf, 2004].

В основе метода опорных векторов для задач регрессии или регрессии опорных векторов (SVR) лежит поиск гиперплоскости, при которой риск в многомерном пространстве будет минимальным. По сравнению с традиционной регрессионной моделью SVR оценивает коэффициенты путем минимизации квадратичных потерь. Так, если прогнозное значение попадает в область гиперплоскости, то потери равны нулю. В противном случае разности прогнозного и фактического значений.

Преимущества метода опорных векторов перед методом наименьших квадратов:

1. SVR более устойчив к выбросам в данных. В отличие от метода наименьших квадратов, на который могут сильно повлиять выбросы, SVR использует функцию потерь, которая штрафует большие ошибки, поэтому они меньше влияют на общую точность модели.

2. SVR более гибок в своей способности моделировать нелинейные данные, чем метод наименьших квадратов, который ограничен только линейными моделями. Это делает его полезным для моделирования сложных отношений между переменными, которые могут быть нелинейными по своей природе.

3. SVR имеет лучшие возможности обобщения, чем метод наименьших квадратов, поскольку он использует методы регуляризации, чтобы избежать переобучения и улучшить свою способность точно обобщать невидимые точки данных.

Расчеты выполнялись с использованием библиотеки `sklearn`. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [Hastie, 2009].

## Данные

В Геофизическом институте ВНЦ РАН создана база данных сильных движений, включающая данные со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Грузия) [Заалишвили и др., 2013]. Для анализа в данной работе были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой KNET (Япония, [www.kyoshin.bosai.go.jp](http://www.kyoshin.bosai.go.jp)) [National Research..., 2019]. База содержит более 10 000 записей на 1000 станций с различными грунтовыми условиями с интенсивностью MSK от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г по декабрь 2013 г. Также в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Из базы данных была сделана выборка, содержащая 150 записей с различными эпицентрными расстояниями, магнитудами и грунтовыми условиями. Набор данных был дополнен логарифмами параметров для последующего регрессионного анализа. Данные были отцентрированы и нормированы на дисперсию. Соответствующие распределения приведены на рисунке 1. Видно, что данные имеют логнормальное распределение. Соответствующая коробочная диаграмма приведена на рисунке 2. Коробочная диаграмма описывает распределение набора данных, показывая медиану, квартили, диапазон и выбросы. Блочная диаграмма — это графическое представление числовых данных, основанное на сводке из пяти чисел. Она состоит из поля, в котором заключены средние 50% данных (межквартильный диапазон), с линиями, выходящими из поля, чтобы показать остальную часть распределения. Нижняя линия представляет 25-й перцентиль (Q1), а верхняя линия представляет 75-й перцентиль (Q3). Медиана представлена линией внутри этого прямоугольника. Далее показаны выбросы, которые могут присутствовать в наборе данных в интервале; разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний; сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний. Данные, выходящие за

пределы указанных интервалов, обычно считаются выбросами. Хорошо видно, что в логарифмическом масштабе «выбросов» значительно меньше. Выбросы не были исключены из набора данных по двум причинам: во-первых, они могут содержать данные важные для анализа и, во-вторых, метод опорных векторов хорошо справляется с подобными выбросами.

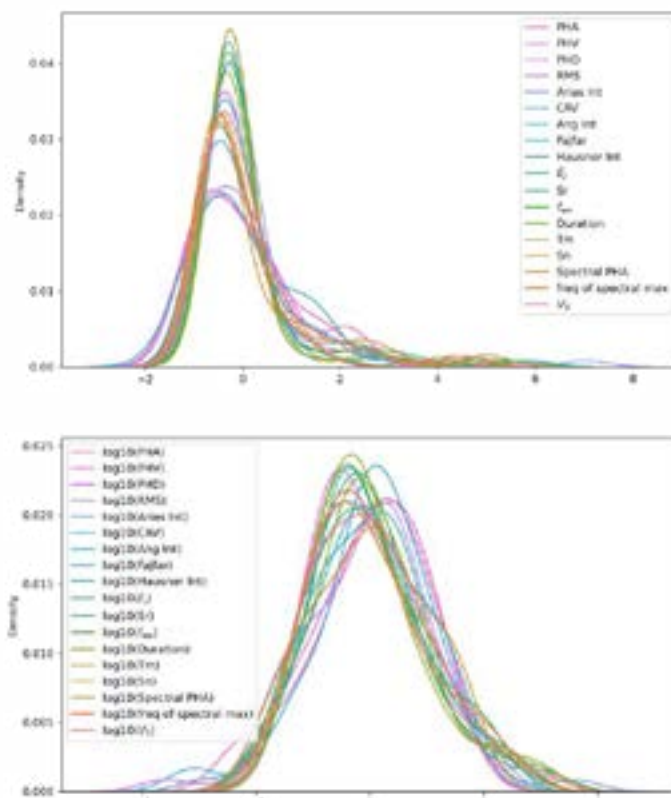


Рис. 1. Распределение нормированных данных /  
Fig. 1. Distribution of normalized data

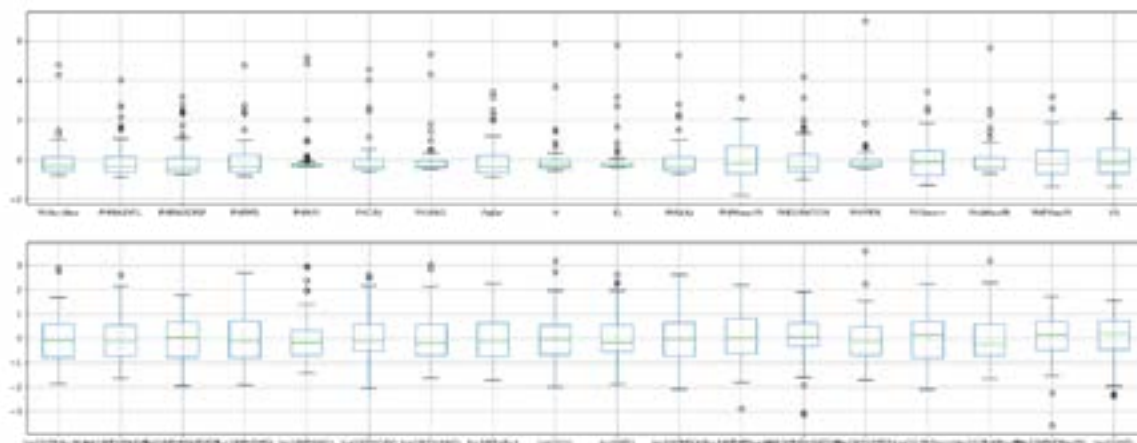


Рис. 2. Коробочная диаграмма исходных данных: анализируемых параметров (а) и параметров в логарифмическом масштабе (б) /  
Fig. 2. Box diagram of the initial data: analyzed parameters (a) and parameters on a logarithmic scale (b)

## Результаты работы и их обсуждение

На первом этапе исследовалась зависимость сейсмической интенсивности от каждого параметра в отдельности. Все результаты приведены в таблице 1. Рассчитаны параметры критерия Фишера (F-test), уровня значимости (p-value), коэффициент детерминации  $R^2$ , средние абсолютные (MAE) и среднеквадратические (RMS) отклонения. Для критерия Фишера рассчитаны соответствующие вероятности, значения p-value более 0,05 выделены жирным шрифтом. Следует отметить, что критерий для p-value <0,05 является необходимым, но вовсе не достаточным условием выбора модели. В частности значительное количество параметров, для которых выполняется p-value <0,05, имеют низкий  $R^2$ . Наилучший результат получен для пиковой скорости с коэффициентом детерминации  $R^2=0,76$ , причем, не только в логарифмическом, но и в линейном масштабе с  $R^2=0,73$  (рис. 3). Зависимости для различных инструментальных мер приведены на рисунке 4. Для спектральных характеристик прямой зависимости не получено (рис. 5). Относительно высокое значение коэффициента детерминации  $R^2=0,59$  получено для меры Фаджфара.

Таблица 1 / Table 1

### Регрессионные модели для одного параметра. / Regression models for one parameter

	Parameters	F-test	F%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
1	log10(PHV)	263.71	1.00	3.04E-23	0.76	0.29	0.34	3.3156	3.73	0.9388	7.17
2	PHV	210.82	1.00	5.68E-21	0.73	0.31	0.36	0.0920	5.87	1.0339	7.14
3	log10(Fajfar)	144.55	1.00	2.18E-17	0.59	0.34	0.45	2.5904	3.56	0.8462	7.16
4	RMS	49.49	1.00	2.56E-09	0.56	0.42	0.46	0.0207	6.26	1.0201	7.27
5	log10(Hausner Int)	37.95	1.00	7.39E-08	0.47	0.41	0.51	1.9373	3.93	0.7456	7.11
6	log10(Spectral PHA)	146.73	1.00	1.59E-17	0.36	0.47	0.56	2.9171	2.29	0.9150	7.23
7	Spectral PHA	105.69	1.00	1.1E-14	0.32	0.44	0.58	0.0136	6.22	1.0351	7.15
8	PHA	82.76	1.00	9.17E-13	0.32	0.46	0.58	0.0031	6.30	0.8226	7.13
9	Fajfar	167.70	1.00	9.28E-19	0.30	0.46	0.59	0.0315	5.99	0.9301	7.03
10	Ang Int	79.58	1.00	1.79E-12	0.22	0.50	0.62	1.94e-4	6.66	0.8162	7.08
11	log10(Ang Int)	197.81	1.00	2.41E-20	0.16	0.56	0.64	2.1889	0.70	1.0046	7.28
12	log10(RMS)	58.57	1.00	2.34E-10	0.15	0.59	0.65	2.7436	3.15	0.9402	7.36
13	Hausner Int	10.05	1.00	0.0024	0.09	0.54	0.67	3.58e-3	6.70	0.4138	6.96
14	log10(PHD)	28.69	1.00	1.53E-06	0.09	0.58	0.67	1.0068	6.79	0.5996	7.19
15	Arias Int	56.53	1.00	3.94E-10	0.07	0.55	0.67	5.13e-5	6.81	0.7195	7.06
16	freq of spectral max	1.06	<b>0.69</b>	0.306465	0.07	0.57	0.68	-0.0172	7.05	-0.0533	6.98
17	PHD	20.49	1.00	3.03E-05	0.03	0.55	0.69	0.0925	6.43	0.6578	6.95
18	log10(Arias Int)	217.62	1.00	2.74E-21	0.00	0.56	0.70	1.5376	2.61	0.9765	7.24
19	CAV	66.09	1.00	3.71E-11	0.00	0.55	0.70	5.07e-4	6.53	0.8187	7.06
20	E j	55.39	1.00	5.28E-10	-0.01	0.57	0.70	2.39e-6	6.73	0.8310	7.06
21	log10(f_aw)	0.01	<b>0.06</b>	<b>0.94</b>	-0.02	0.59	0.71	-0.3995	7.30	-0.0696	6.95
22	Tm	0.50	<b>0.52</b>	<b>0.48</b>	-0.03	0.60	0.71	-0.0984	7.05	-0.0885	7.00
23	Sr	64.84	1.00	5E-11	-0.04	0.57	0.72	1.59e-3	6.42	0.8667	7.11
24	log10(Tm)	0.01	<b>0.08</b>	<b>0.92</b>	-0.07	0.60	0.72	-0.1678	6.89	-0.0628	6.97
25	log10(freq of spectral max)	0.01	<b>0.08</b>	<b>0.92</b>	-0.07	0.60	0.72	0.1678	6.89	0.0628	6.98
26	log10(E_j)	101.69	1.00	2.27E-14	-0.07	0.49	0.73	1.2498	1.59	0.8912	7.16
27	f_aw	0.15	<b>0.30</b>	<b>0.7</b>	-0.08	0.60	0.73	-0.0451	7.31	-0.1433	6.94
28	log10(Sn)	0.33	<b>0.43</b>	<b>0.57</b>	-0.09	0.60	0.73	-0.3487	7.20	-0.0845	6.95
29	Sn	0.04	<b>0.15</b>	<b>0.85</b>	-0.09	0.61	0.73	-0.0230	7.10	-0.0839	6.95
30	log10(Sr)	50.27	1.00	2.07E-09	-0.27	0.68	0.79	1.9346	2.49	0.8055	7.19
31	log10(PHA)	80.54	1.00	1.46E-12	-0.37	0.72	0.82	3.2066	0.02	0.9853	7.43
32	V_S	1.62	<b>0.79</b>	<b>0.21</b>	-0.41	0.70	0.83	8.28e-4	6.61	0.3547	7.17
33	Duration	0.69	<b>0.59</b>	<b>0.41</b>	-0.45	0.67	0.84	5.77e-3	6.69	0.2337	6.93
34	log10(Duration)	1.60	<b>0.79</b>	<b>0.21</b>	-0.51	0.71	0.86	0.5703	6.20	0.2731	7.01
35	log10(CAV)	69.99	1.00	1.5E-11	-0.51	0.66	0.86	1.7237	2.48	0.7767	7.23
36	log10(V_S)	2.69	<b>0.89</b>	<b>0.11</b>	-0.63	0.74	0.89	1.2293	3.87	0.3929	7.22

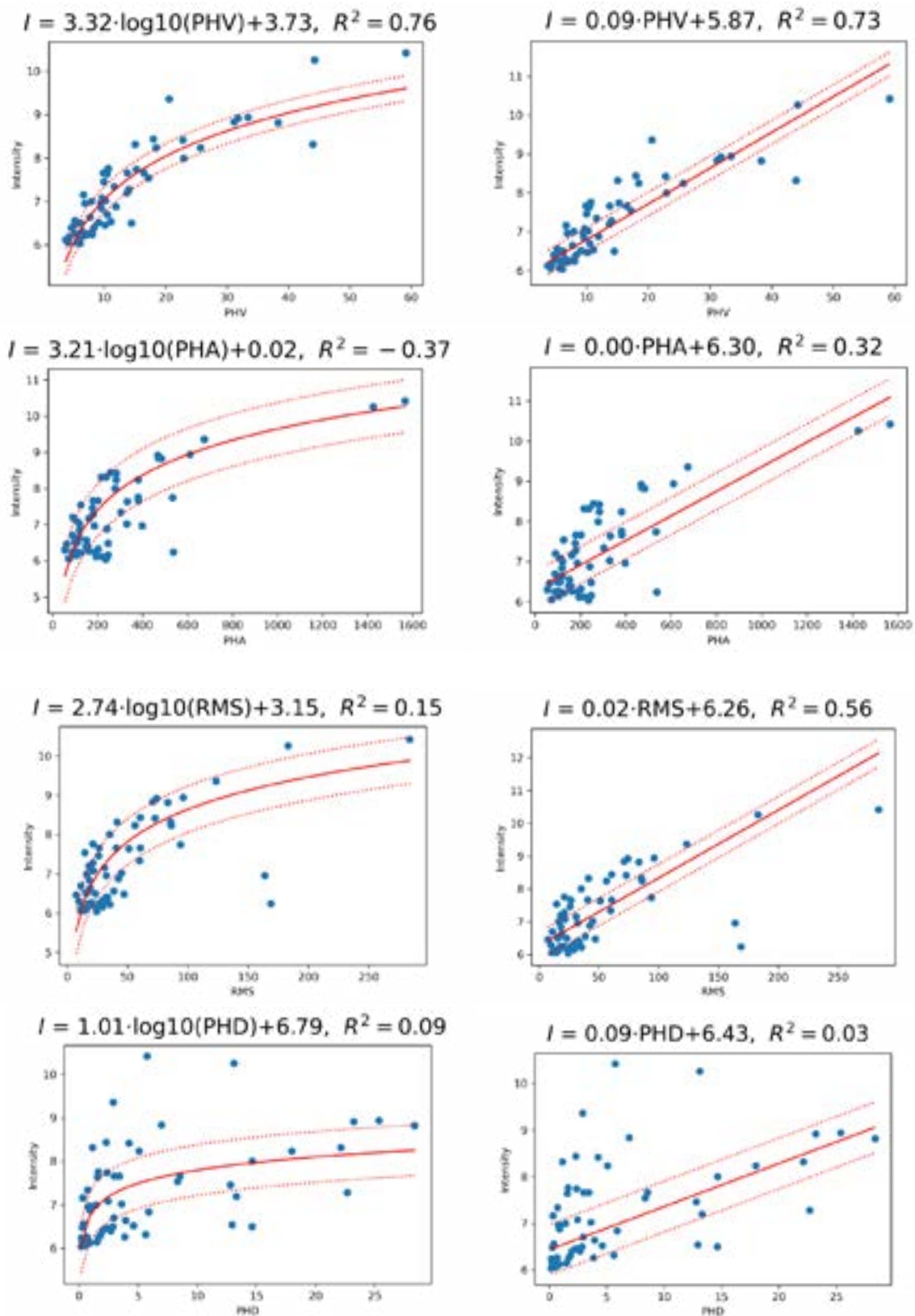


Рис. 3. Связь амплитудных характеристик с макросейсмической интенсивностью /  
 Fig. 3. Relationship of amplitude characteristics with macroseismic intensity

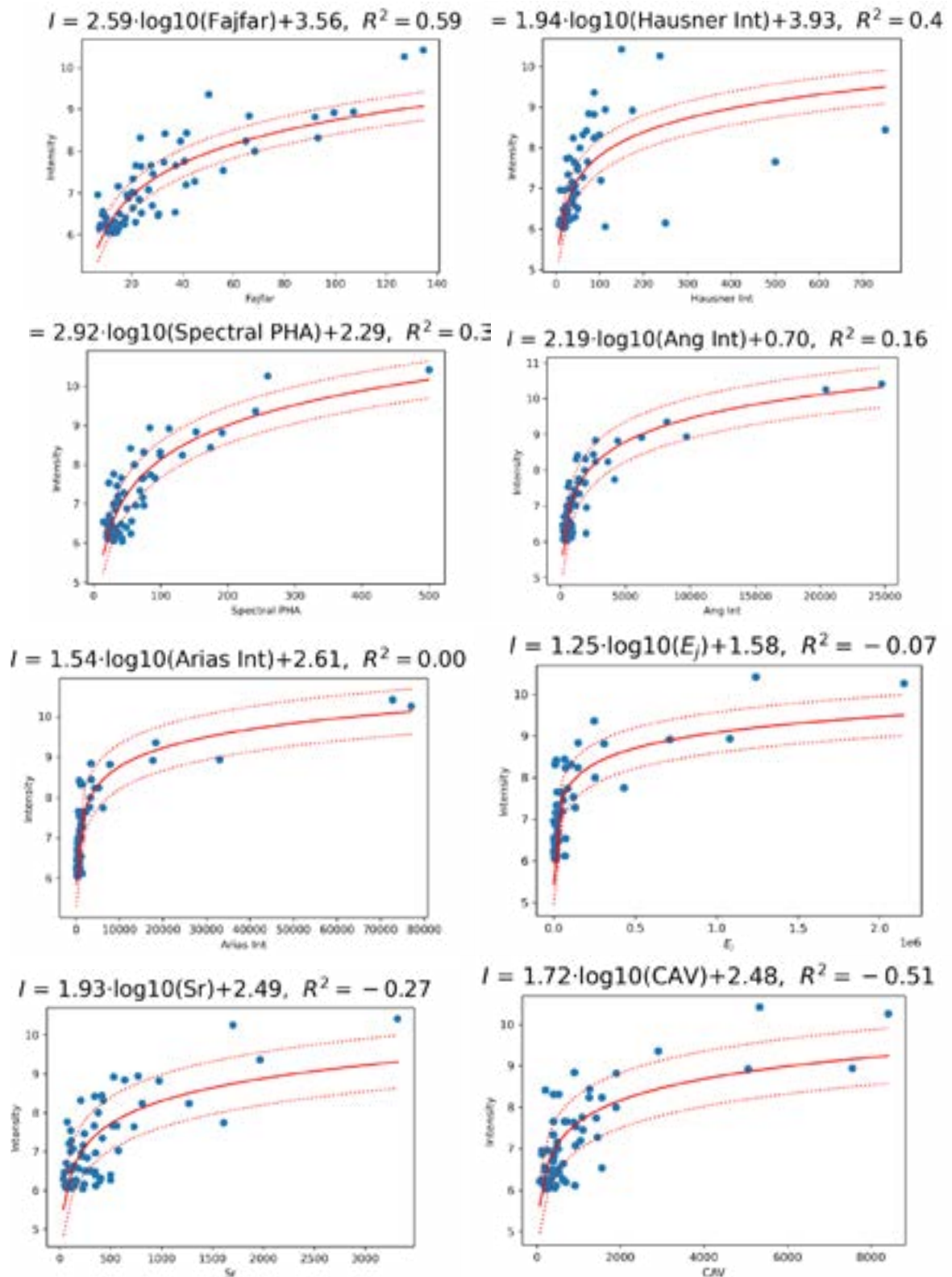


Рис. 4. Связь различных инструментальных мер с сейсмической интенсивностью /

Fig. 4. Connection of various instrumental measures with seismic intensity



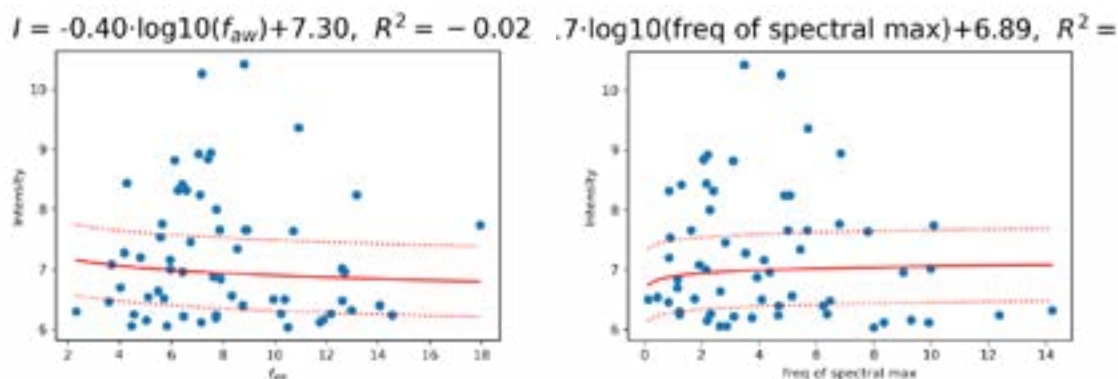


Рис. 5. Зависимость интенсивности от спектральных характеристик: средневзвешенной частоты (а) и частоты максимума спектра Фурье (б) /

Fig. 5. Dependence of intensity on spectral characteristics: weighted average frequency (a) and maximum frequency of the Fourier spectrum (b)

На следующем этапе рассмотрены регрессионные выражения зависимости интенсивности от двух параметров при различных их комбинациях. В таблице 2 приведены значения с максимальным R<sup>2</sup> до 0,7 и минимальными MAE до 0,35. Статистические критерии F-test, и p-value приведены для каждого из параметров. Нормированные коэффициенты также перечислены.

Комбинация двух параметров позволила повысить значения коэффициента детерминации, в частности при совместном использовании скорости и средневзвешенного ускорения до 0,82 и пиковой скорости до 0,8 (рис. 6). При этом наилучший результат получен для среднеквадратического значения ускорения (RMS) и меры Фаджфара (Fajfar). Далее следуют сочетания разных параметров с пиковой скоростью. Лучшее из них с кумулятивной абсолютной скоростью, R<sup>2</sup>=0,82, MAE=0,22 (рис. 6). Модели на основе сочетания пиковой скорости с различными определениями ускорения (пиковыми PHA и среднеквадратическими RMS) приведены на рисунке 7. Интенсивность Анга занимает 6 и 7 места в рейтинге двух параметрических моделей (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Регрессионные модели для двух параметров. / Regression models for two parameters**

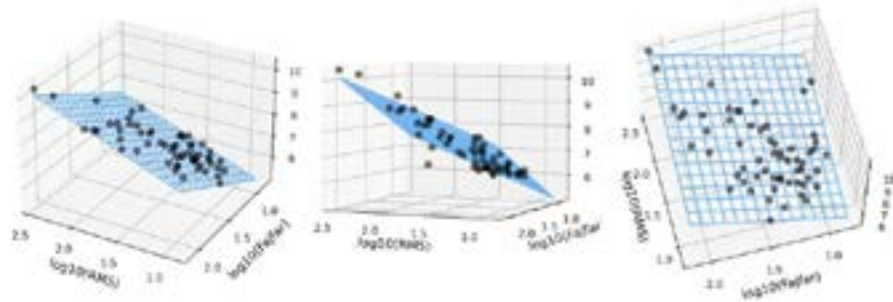
	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
1	['log10(RMS)', 'log10(Fajfar)']	[58.58 144.55]	[1. 1.]	[2.34e-10 2.18e-17]	0.85	0.22	0.27	[1.52, 2.04]	2.04	[0.52 0.67]	7.21
2	['log10(PHV)', 'log10(CAV)']	[263.71 69.99]	[1. 1.]	[3.04e-23 1.50e-11]	0.82	0.22	0.29	[2.60, 0.55]	2.94	[0.74 0.25]	7.15
3	['RMS', 'log10(PHV)']	[49.49 263.71]	[1. 1.]	[2.56e-09 3.04e-23]	0.82	0.27	0.30	[0.006439, 2.74]	4.07	[0.32 0.77]	7.22
4	['PHA', 'log10(PHV)']	[82.76 263.71]	[1. 1.]	[9.17e-13 3.04e-23]	0.81	0.27	0.30	[0.001367, 2.54]	4.20	[0.37 0.72]	7.20
5	['PHV', 'log10(RMS)']	[210.82 58.58]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.34e-10]	0.81	0.25	0.31	[0.0774, 0.73]	5.01	[0.87 0.25]	7.20
6	['log10(PHV)', 'log10(Ang Int)']	[263.71 197.81]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.41e-20]	0.81	0.27	0.31	[1.75, 1.21]	1.76	[0.50 0.56]	7.23
7	['Ang Int', 'log10(PHV)']	[79.58 263.71]	[1. 1.]	[1.79e-12 3.04e-23]	0.81	0.27	0.31	[7.93e-05, 2.55]	4.37	[0.33 0.72]	7.19

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
8	['log10(PHV)', 'log10(RMS)']	[263.71 58.58]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.34e-10]	0.80	0.25	0.31	[2.67, 0.96]	2.98	[0.76 0.33]	7.22
9	['RMS', 'log10(Fajfar)']	[49.49 144.56]	[1. 1.]	[2.56e-09 2.18e-17]	0.80	0.26	0.31	[0.01119, 2.11]	3.76	[0.53 0.69]	7.22
10	['Tm', 'log10(PHV)']	[0.50 263.71]	[0.52 1.]	[0.48 3.04e-23]	0.80	0.27	0.31	[-0.21, 3.33]	3.80	[-0.19 0.94]	7.15
11	['log10(PHV)', 'log10(V_S)']	[263.71 2.69]	[1. 0.89]	[3.04e-23 1.07e-01]	0.80	0.28	0.31	[3.11, 0.51]	2.60	[0.88 0.16]	7.22
12	['log10(PHA)', 'log10(PHV)']	[80.54 263.71]	[1. 1.]	[1.46e-12 3.04e-23]	0.80	0.27	0.31	[1.25, 2.45]	1.82	[0.38 0.69]	7.23
13	['log10(PHV)', 'log10(E_j)']	[263.71 101.69]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.27e-14]	0.80	0.26	0.32	[2.37, 0.41]	2.88	[0.67 0.29]	7.17
14	['PHV', 'log10(PHV)']	[210.82 263.71]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.04e-23]	0.80	0.28	0.32	[0.0467, 1.67]	4.77	[0.53 0.47]	7.16
15	['CAV', 'log10(PHV)']	[66.09 263.71]	[1. 1.]	[3.71e-11 3.04e-23]	0.79	0.28	0.32	[1.902e-4, 2.58]	4.27	[0.31 0.73]	7.15
16	['log10(PHA)', 'log10(freq of max)']	[80.54 0.009]	[1. 0.08]	[1.46e-12 0.92]	0.79	0.27	0.32	[3.65, -1.59]	-0.30	[1.12 -0.60]	7.31
17	['log10(PHA)', 'log10(Tm)']	[80.54 0.009]	[1. 0.08]	[1.46e-12 0.92]	0.79	0.27	0.32	[3.65, 1.59]	-0.30	[1.12 0.60]	7.31
18	['RMS', 'log10(freq of max)']	[49.49 0.009]	[1. 0.08]	[2.56e-09 0.92]	0.79	0.28	0.32	[0.02190, -0.58]	6.50	[1.08 -0.22]	7.23
19	['RMS', 'log10(Tm)']	[49.49 0.009]	[1. 0.08]	[2.56e-09 0.92]	0.79	0.28	0.32	[0.02190, 0.58]	6.50	[1.08 0.22]	7.26
20	['Spectral PHA', 'log10(PHV)']	[105.69 263.71]	[1. 1.]	[1.10e-14 3.04e-23]	0.79	0.26	0.32	[0.007748, 2.20]	4.42	[0.59 0.62]	7.23
21	['Arias Int', 'log10(PHV)']	[56.53 263.71]	[1. 1.]	[3.94e-10 3.04e-23]	0.79	0.29	0.32	[1.99e-05, 2.72]	4.25	[0.28 0.77]	7.17
22	['V_S', 'log10(PHV)']	[1.62 263.71]	[0.79 1.]	[0.21 3.04e-23]	0.78	0.30	0.33	[0.0003305, 3.16]	3.71	[0.14 0.90]	7.21
23	['E_j', 'log10(PHV)']	[55.39 263.71]	[1. 1.]	[5.29e-10 3.04e-23]	0.77	0.30	0.33	[8.24e-07, 2.65]	4.30	[0.29 0.75]	7.16
24	['log10(PHV)', 'log10(Spectral PHA)']	[263.71 146.74]	[1. 1.]	[3.04e-23 1.60e-17]	0.77	0.28	0.33	[2.23, 1.46]	2.43	[0.63 0.46]	7.21
25	['PHV', 'RMS']	[210.82 49.49]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.56e-09]	0.77	0.28	0.33	[0.0852, 0.003167]	5.85	[0.96 0.16]	7.18
26	['log10(Ang Int)', 'log10(Tm)']	[197.81 0.009]	[1. 0.08]	[2.41e-20 0.92]	0.77	0.27	0.34	[2.29, 0.90]	0.86	[1.05 0.34]	7.28
27	['log10(Ang Int)', 'log10(freq of max)']	[197.81 0.009]	[1. 0.08]	[2.41e-20 0.92]	0.77	0.27	0.34	[2.29, -0.90]	0.86	[1.05 -0.34]	7.28
28	['PHV', 'log10(Sr)']	[210.82 50.27]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.07e-09]	0.76	0.27	0.34	[0.077, 0.55]	4.77	[0.87 0.23]	7.20
29	['log10(PHV)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[263.71 0.005]	[1. 0.06]	[3.04e-23 9.43e-01]	0.76	0.32	0.34	[3.30, 0.84]	3.04	[0.94 0.15]	7.20
30	['Sn', 'log10(PHV)']	[0.035 263.71]	[0.15 1.]	[8.52e-01 3.04e-23]	0.76	0.30	0.34	[-0.0036, 3.30]	3.76	[-0.013 0.93]	7.16
31	['log10(PHV)', 'log10(Sn)']	[263.71 0.33]	[1. 0.43]	[3.04e-23 5.69e-01]	0.76	0.30	0.34	[3.29, -0.061]	3.79	[0.93 -0.015]	7.16
32	['Hausner Int', 'log10(PHV)']	[10.05 263.71]	[0.99 1.]	[2.43e-03 3.04e-23]	0.76	0.30	0.34	[0.000667, 3.24]	3.75	[0.077 0.92]	7.16
33	['PHV', 'log10(Spectral PHA)']	[210.82 146.73]	[1. 1.]	[5.67e-21 1.59e-17]	0.76	0.27	0.34	[0.0639, 1.31]	4.12	[0.72 0.41]	7.22

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
34	['PHV', 'log10(PHD)']	[210.82 28.69]	[1. 1.]	[5.67e-21 1.53e-06]	0.76	0.29	0.35	[0.085, 0.12]	5.93	[0.96 0.071]	7.16
35	['PHA', 'PHV']	[ 82.76 210.82]	[1. 1.]	[9.17e-13 5.68e-21]	0.75	0.30	0.35	[0.0007, 0.0788]	5.90	[0.19 0.89]	7.18
36	['PHV', 'log10(V_s)']	[210.82 2.69]	[1. 0.90]	[5.68e-21 1.07e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.0899, 0.23]	5.29	[1.01 0.07 ]	7.16
37	['PHV', 'Tm']	[210.82 0.500]	[1. 0.52]	[5.68e-21 4.82e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.093, -0.13]	5.94	[1.04 -0.12]	7.15
38	['freq of spectral max', 'log10(Ang Int)']	[ 1.06 197.81]	[0.70 1.]	[3.06e-01 2.41e-20]	0.75	0.26	0.35	[-0.13, 2.29]	0.88	[-0.39 1.05]	7.22
39	['PHV', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[211 5.11e-03]	[1. 0.06]	[5.68e-21 9.43e-01]	0.75	0.30	0.35	[0.093, 0.28]	5.63	[1.05 0.048]	7.16
40	['log10(PHV)', 'log10(Fajfar)']	[263.71 144.56]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.18e-17]	0.75	0.30	0.35	[3.63, -0.33]	3.86	[1.03 -0.11]	7.16
41	['PHV', '\$f_{aw}\$']	[2.11e+02 0.149]	[1. 0.30]	[5.68e-21 0.701]	0.75	0.30	0.35	[0.093, 0.0143]	5.76	[1.05 0.05]	7.16
42	['PHV', 'Sr']	[210.82 64.84]	[1. 1.]	[5.68e-21 5.01e-11]	0.75	0.29	0.35	[0.079, 0.00053]	5.88	[0.89 0.29]	7.20
43	['RMS', 'freq of spectral max']	[49.49 1.06 ]	[1. 0.69]	[2.56e-09 0.306]	0.75	0.30	0.35	[0.0219, -0.122]	6.68	[1.08 -0.38]	7.20
44	['log10(PHV)', 'log10(Hausner Int)']	[263.71 37.95]	[1. 1.]	[3.04e-23 7.39e-08]	0.75	0.31	0.35	[3.12, 0.27]	3.49	[0.88 0.10]	7.16
45	['Fajfar', 'log10(PHV)']	[167.70 263.71]	[1. 1.]	[9.28e-19 3.04e-23]	0.74	0.31	0.35	[0.0122, 2.091]	4.55	[0.36 0.59]	7.13
46	['RMS', 'log10(Hausner Int)']	[49.49 37.95 ]	[1. 1.]	[2.56e-09 7.39e-08]	0.74	0.30	0.36	[0.0122, 1.82]	3.66	[0.60 0.70]	7.24
47	['log10(PHV)', 'log10(Arias Int)']	[263.71 217.62]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.74e-21]	0.74	0.27	0.36	[1.58, 0.93]	2.78	[0.45 0.59]	7.23
48	['PHV', 'PHD']	[210.82 20.49]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.03e-05]	0.74	0.30	0.36	[0.097, -0.0080]	5.87	[1.09 -0.057]	7.16
49	['PHV', 'log10(PHA)']	[210.82 80.54]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.46e-12]	0.74	0.30	0.36	[0.0659, 1.115]	3.73	[0.74 0.34]	7.22
50	['log10(Fajfar)', 'log10(Spectral PHA)']	[144.56 146.74]	[1. 1.]	[2.18e-17 1.60e-17]	0.74	0.26	0.36	[1.68, 1.90]	1.62	[0.55 0.60]	7.18
51	['PHV', 'log10(Duration)']	[210.82 1.60]	[1. 0.79]	[5.68e-21 2.11e-01]	0.73	0.31	0.36	[0.092, 0.0208]	5.84	[1.04 0.01]	7.15
52	['PHV', 'log10(Fajfar)']	[210.82 144.55]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.18e-17]	0.73	0.30	0.36	[0.062, 0.90]	5.04	[0.69 0.29]	7.13
53	['PHV', 'Ang Int']	[210.82 79.58]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.79e-12]	0.73	0.31	0.36	[0.085, 2.51e-05]	5.92	[0.96 0.11 ]	7.15
54	['PHV', 'log10(Hausner Int)']	[210.82 37.95]	[1. 1.]	[5.68e-21 7.39e-08]	0.73	0.31	0.37	[0.0797, 0.464]	5.27	[0.90 0.18]	7.14
55	['PHV', 'Arias Int']	[210.82 56.53]	[1. 1.]	[5.68e-21 3.94e-10]	0.73	0.31	0.37	[0.088, 4.06e-06]	5.91	[0.99 0.06]	7.15
56	['log10(PHV)', 'log10(Tm)']	[263.71 9.28e-03]	[1. 0.08]	[3.04e-23 0.92]	0.72	0.33	0.37	[3.34, -0.74]	3.35	[ 0.95 -0.28]	7.19
57	['log10(PHV)', 'log10(freq of spectral max)']	[263.71 9.28e-03]	[1. 0.08]	[3.04e-23 0.92]	0.72	0.33	0.37	[3.34, 0.74]	3.35	[0.95 0.28]	7.19
58	['log10(Fajfar)', 'log10(Duration)']	[144.55]	[1. 0.79]	[2.18e-17 0.211]	0.72	0.30	0.37	[3.33, -1.03]	4.02	[1.09 -0.49]	7.18
59	['RMS', 'log10(f_{aw})']	[49.49 5.11e-03]	[1. 0.06]	[2.56e-09 0.94]	0.72	0.34	0.37	[0.0215, -1.55]	7.54	[1.06 -0.27]	7.23
60	['PHV', 'Sn']	[210.82 353.62]	[1. 0.15]	[5.67e-21 0.85e-01]	0.72	0.31	0.37	[0.092, -0.0049]	5.89	[1.04 -0.02]	7.14
61	['Sr', 'log10(PHV)']	[ 64.84 263.71 ]	[1. 1.]	[5.00e-11 3.04e-23]	0.72	0.34	0.37	[0.00069, 2.55]	4.24	[0.38 0.72]	7.19

	Parameters	F-test	f%	pi-value	R2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff norm	Intercept norm
62	['PHV', 'Hausner Int']	[210.82 10.049]	[1. 1.]	[5.68e-21 2.43e-03]	0.72	0.31	0.37	[0.0869, 0.00119]	5.86	[0.98 0.14]	7.15
63	['PHV', 'log10(Sn)']	[210.82 0.33]	[1. 0.43]	[5.68e-21 0.57e-01]	0.71	0.32	0.37	[0.092, -0.131]	5.97	[1.04 -0.03]	7.14
64	['Duration', 'log10(PHV)']	[ 0.69 263.71]	[0.59 1.]	[0.41 3.04e-23]	0.71	0.31	0.38	[-0.00186, 3.33]	3.78	[-0.075 0.94]	7.16
65	['PHV', 'Spectral PHA']	[210.82 105.69]	[1. 1.]	[5.68e-21 1.10e-14]	0.71	0.31	0.38	[0.0657, 0.00615]	5.88	[0.74 0.47]	7.20
66	['PHV', 'V_S']	[210.82 1.62]	[1. 0.79]	[5.68e-21 0.21]	0.71	0.31	0.38	[0.0923, -6.93e-05]	5.91	[1.04 -0.03]	7.14
67	['log10(PHV)', 'log10(Duration)']	[263.71 1.60]	[1. 0.79]	[3.04e-23 0.21]	0.71	0.30	0.38	[3.36, -0.22]	3.995	[0.95 -0.11]	7.17
68	['f_aw', 'log10(PHV)']	[14.85 263.71]	[0.3 1.]	[0.70 3.04e-23]	0.71	0.35	0.38	[0.05, 3.38]	3.27	[0.16 0.96]	7.18
69	['PHA', 'log10(Hausner Int)']	[82.76 37.95]	[1. 1.]	[9.17e-13 7.39e-08]	0.71	0.29	0.38	[0.00255, 1.2882]	4.37	[0.69 0.50]	7.18
70	['PHA', 'freq of spectral max']	[82.76 1.06]	[1. 0.69]	[9.17e-13 0.31e-01]	0.70	0.28	0.38	[0.0046, -0.151]	6.64	[1.25 -0.47]	7.24
71	['log10(PHV)', 'log10(Sr)']	[263.71 50.27]	[1. 1.]	[3.04e-23 2.1e-09]	0.70	0.33	0.38	[2.70, 0.76]	2.56	[0.76 0.32]	7.21
72	['PHV', '\$E_j\$']	[210.82 55.39]	[1. 1.]	[5.68e-21 5.29e-10]	0.70	0.32	0.38	[0.084, 2.7e-07]	5.94	[0.94 0.09]	7.1363
73	['RMS', '\$f_{aw}\$']	[49.49 0.15]	[1. 0.30]	[2.56e-09 0.70]	0.70	0.35	0.38	[0.021, -0.100]	6.99	[1.05 -0.32]	7.2097

$$I = 1.52 \cdot \log_{10}(\text{RMS}) + 2.04 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 2.04, R^2 = 0.85, \text{MAE} = 0.22$$



$$I = 2.60 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 0.55 \cdot \log_{10}(\text{CAV}) + 2.94, R^2 = 0.82, \text{MAE} = 0.22$$

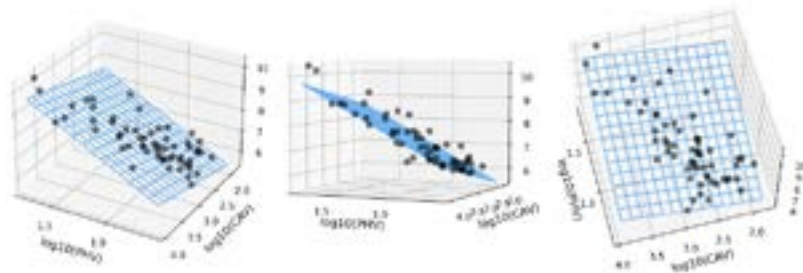


Рис. 6. Лучшие регрессионные модели для двух параметров по  $R^2$  и MAE /

Fig. 6. The best regression models for two parameters by  $R^2$  and MAE

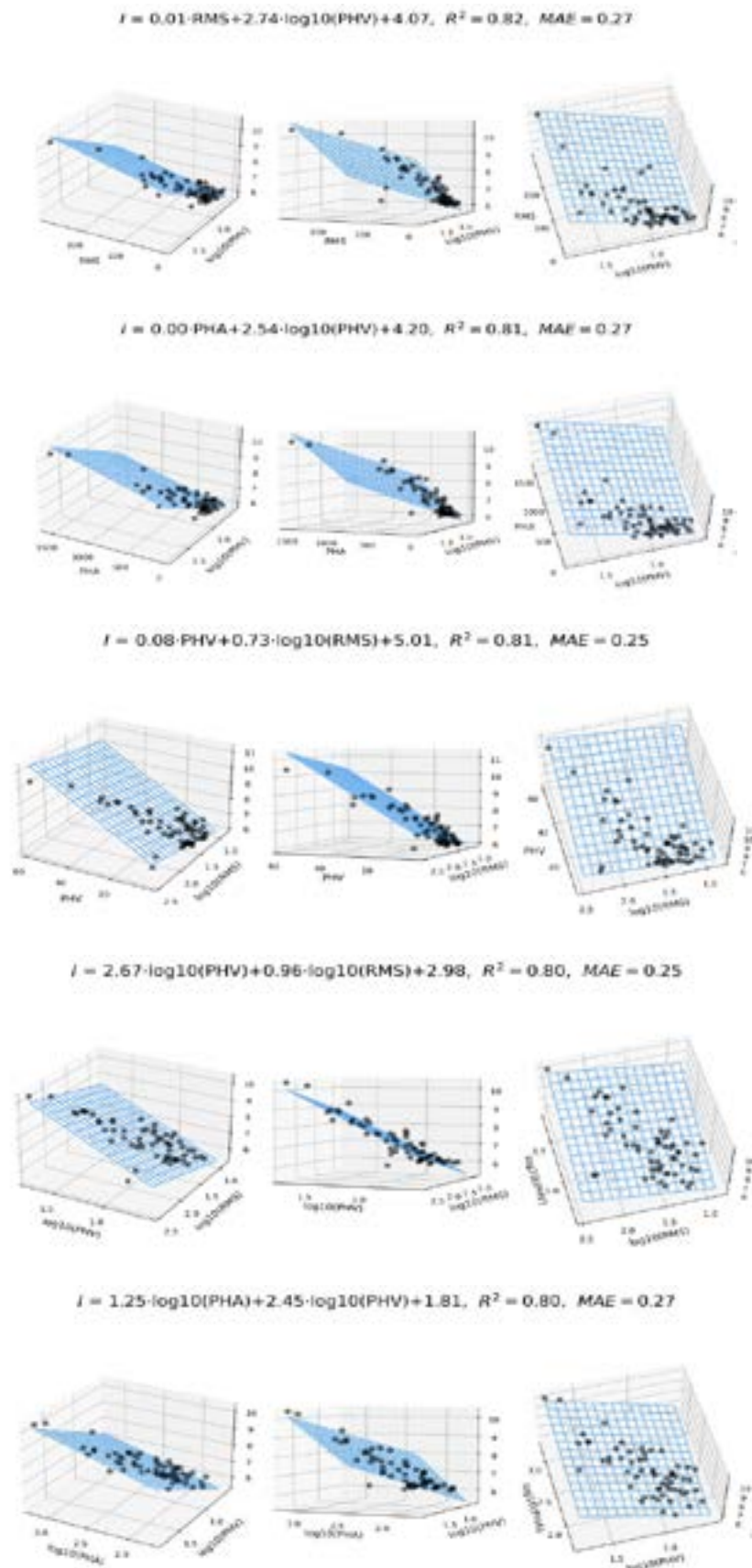
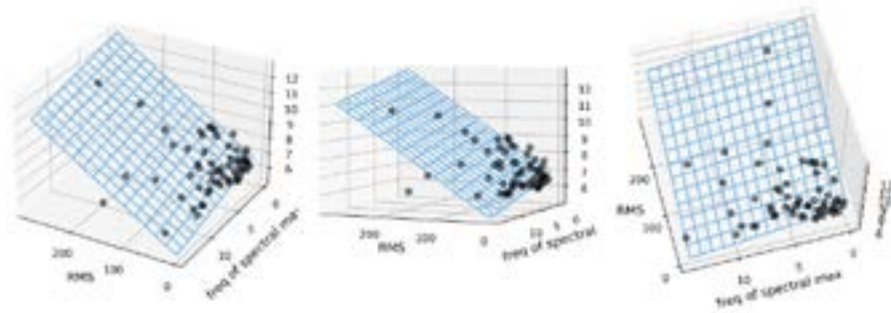
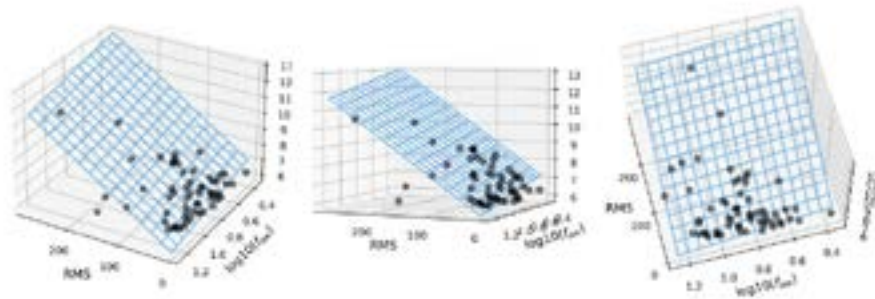


Рис. 7. Регрессионные модели, использующие значения скорости и ускорения /  
 Fig. 7. Regression models using velocity and acceleration values

$$I = 0.02 \cdot \text{RMS} - 0.12 \cdot \text{freq of spectral max} + 6.67, R^2 = 0.75, \text{MAE} = 0.30$$



$$I = 0.02 \cdot \text{RMS} - 1.55 \cdot \log_{10}(f_{\text{max}}) + 7.54, R^2 = 0.72, \text{MAE} = 0.34$$



$$I = 1.78 \cdot \log_{10}(E) - 1.40 \cdot \log_{10}(\text{Duration}) + 1.30, R^2 = 0.67, \text{MAE} = 0.34$$

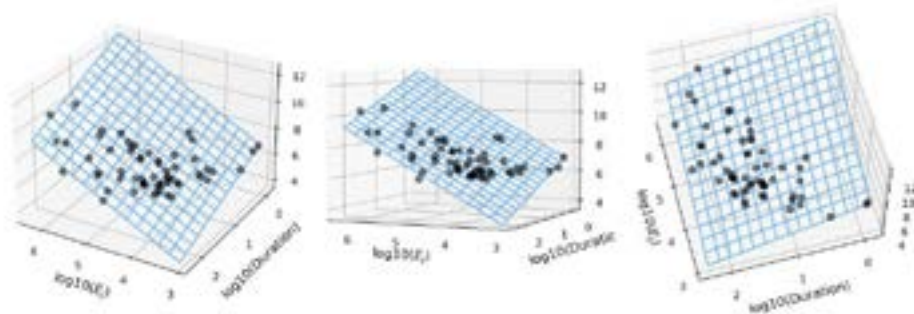


Рис. 8. Регрессионные модели, учитывающие спектральные особенности воздействия, продолжительность и полную выделяющуюся энергию /

Fig. 8. Regression models taking into account the spectral features of the impact, duration and total released energy.

## Выводы

1. Для регрессионной модели с одним параметром наилучшие показатели метриков получены для пиковой горизонтальной скорости PGV:  $R^2=0,76$ ;  $\text{MAE}=0,29$ . Физический смысл имеет квадрат скорости, пропорциональный энергии, при этом пиковые значения соответствуют максимальным кратковременным воздействиям,

т.е. энергии, которую система не может поглотить и рассеять в ограниченный промежуток времени.

2. Введением дополнительных параметров к скорости удается повысить  $R^2$  до 0,85 (с кумулятивной абсолютной скоростью) и 0,8-0,82 с различными сочетаниями ускорений (рис. 7).

3. Наилучшие показатели достигаются для модели с комбинацией среднеквадратической скорости и меры Фаджфара. Учитывая, что мера Фаджфара представляет собой произведение пиковой скорости на корень четвертой степени из продолжительности воздействия новый параметр можно рассматривать как модифицированную меру Фаджфара:  $PGV \cdot RMS^{3/4} \cdot Dur^{1/4}$ .

4. Представляет интерес рассмотреть зависимости, полученные без участия пиковой скорости, и содержащие амплитудные и частотные характеристики: частоту спектрального максимума, среднеквадратическое ускорение и средневзвешенную частоту, энергию и продолжительность воздействия (рис. 8). Ускорения характеризуют силы, которые воздействуют на систему, на определенных преобладающих частотах. При этом согласно полученным закономерностям с увеличением преобладающей частоты интенсивность уменьшается. Аналогично с увеличением продолжительности (отрицательный коэффициент) происходит уменьшение интенсивности, т.е. вся энергия сигнала распределяется в более длительный промежуток времени и система успевает его поглощать без повреждений.

## Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСП в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
2. Габеева И.Л., Бурдзиева О.Г. Механизмы формирования интенсивности землетрясений в горных районах. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – №3. – С. 53–56.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок (учебное пособие). – М.: Наука, 2009. – 350 с.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И. Взаимосвязь величины макро-сейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Гюбанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007
5. 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
6. Курбанов Х.Х., Лин Хонг, Сорокина Г.В., Уздин А.М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №3. – С. 34–60. DOI: 10.46698/VNC.2022.47.47.003.
7. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer, S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476–1490.
8. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. // Springer. – 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
9. Karimzadeh S., Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14(5). – Article 396. DOI: 10.1007/s12517-021-06812-1

10. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1st ed. // Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. – 1996. – pp. 65–84.
11. Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. // *Journal of Earthquake Engineering*. – 1998. – No.2:3. – pp. 391-417, DOI: 10.1080/13632469809350328
12. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 18. – pp. 1-34. 10.1007/s10518-019-00782-2.
13. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // *J. Seismol.* – 2009. – Vol. 14. – pp. 413–428.
14. 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
15. Smola A.J., Schölkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression. // *Statistics and Computing archive*. – 2004. – Vol. 14. Iss. 3. – pp. 199-222.
16. 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(2). – p. 513. DOI: 10.1193/1.2923918
17. Trifunac M.D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1975. – Vol. 65. – pp. 139–162.
18. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. // *Earthq. Spectra*. – 1999. – Vol. 15. – pp. 557–564.
19. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014a. – Vol. 50(2). – pp. 263–272.
20. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014b. – Vol. 50(5). – pp. 707–718.
21. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. // *International Journal of GEOMATE*. – 2016. – Vol. 10(1). – pp. 1656–1661.
22. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020. – Vol. 10(3). – pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.
23. Zhang Ming, Yu Zhang, Guangchun Zhou. Study on Instrumental Intensity Using Wenchuan Earthquake Records. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 226-228. – pp. 2235-2239.

## References

1. Aptikaev F.F. About OSR maps in accelerations. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008 (In Russ.)
2. Gabeeva I.L., Burdzieva O.G. Mechanisms of earthquake intensity formation in mountainous areas. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2008. No. 3. pp. 53–56. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka, 2009. 350 p. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquakes of 2002. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007 (In Russ.)
5. V. B. Zaalishvili, K. S. Kharebov, and A. K. Kharebov, Creation of databases of strong



movements based on modern views. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537 (In Russ.)

6. Kurbanov Kh.Kh., Lin Hong, Sorokina G.V., Uzdin A.M. Characteristics of the seismic movement of the day surface. Their use in earthquake-resistant construction. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 34–60. DOI: 10.46698/VNC.2022.47.47.003.

7. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer, S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICES): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. pp. 1476–1490.

8. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Springer. 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7

9. Karimzadeh S., Askan A. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. Article 396. DOI: 10.1007/s12517-021-06812-1.

10. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, 1st ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA. 1996. pp. 65–84.

11. Koliopoulos P.K., Margaris B.N., Klimis N.S. Duration and energy characteristics of Greek strong motion records. *Journal of Earthquake Engineering*. 1998. No.2:3. pp. 391-417, DOI: 10.1080/13632469809350328.

12. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020. Vol. 18. pp. 1-34. 10.1007/s10518-019-00782-2.

13. Musson R.M.W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. *J. Seismol.* 2009. Vol. 14. pp. 413–428.

14. 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

15. Smola A.J., Schölkopf B. A Tutorial on Support Vector Regression. *Statistics and Computing archive*. 2004. Vol. 14. Issue 3. pp. 199–222.

16. 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. p. 513. DOI: 10.1193/1.2923918.

17. Trifunac M.D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1975. Vol. 65. pp. 139–162.

18. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthq. Spectra*. 1999. Vol. 15. pp. 557–564.

19. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Mel'kov D.A. Instrumental geophysical monitoring in the territory of northern Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014a. Vol. 50(2). pp. 263–272.

20. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014b. Vol. 50(5). pp. 707–718.

21. Zaalishvili V., Mel'kov D., Kanukov A., Dzeranov B. Spectral-temporal features of seismic loadings on the basis of strong motion wavelet database. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10(1). pp. 1656–1661

22. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10(3). pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

23. Zhang Ming, Yu Zhang, Guangchun Zhou. Study on Instrumental Intensity Using Wenchuan Earthquake Records. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 226-228. pp. 2235-2239.