

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9510

МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЯЗИ ПИКОВОГО УСКОРЕНИЯ С МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ БАЛЛЬНОСТЬЮ СОТРЯСЕНИЙ ГРУНТА

© 2017 Ю.К. Чернов¹, д.ф.-м.н., проф., А.Ю.Чернов², к.т.н.

¹Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Институт строительства ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", Россия, 355029, Ставропольский край, г.Ставрополь, пр.Кулакова 2

Предложены основанные на статистическом анализе большого объема мировых данных модели для оценки вероятных пиковых ускорений грунта по макросейсмической интенсивности произошедших или прогнозируемых сильных землетрясений и наоборот, для оценки макросейсмической силы сотрясений по данным об ускорениях. Показано, что для описания в широком диапазоне интенсивностей (3-11 баллов MSK) связи балльности с пиковыми амплитудами ускорений колебаний грунта лучше подходят кусочно-линейные аппроксимации с различными коэффициентами регрессии. При использовании же распространенных в настоящее время линейных соотношений может, в частности, происходить недооценка вероятных пиковых ускорений в диапазоне средних и низких макросейсмических интенсивностей (3-7 баллов MSK) и, наоборот, переоценка вероятных ускорений при высоких балльностях сотрясений (9-11 баллов MSK).

Ключевые слова: сильные землетрясения, пиковые ускорения колебаний грунта, макросейсмическая балльность сотрясений, сейсмические воздействия, сейсмическая опасность.

Актуальность. Выявление связей между физическими параметрами движений грунта и макросейсмической интенсивностью землетрясений из-за их высокой практической значимости как правило проводится в виде установления корреляций между максимальными ускорениями грунта и балльностью сотрясений. Подробный обзор таких работ в историческом аспекте дается в [Eiby, 1966; Artikaev, 1981; Аптикаев, 2001]. Общий вывод сводится к тому, что по мере поступления новых экспериментальных данных происходит корректировка предыдущих зависимостей, что делает актуальной периодическую переоценку вышеуказанных зависимостей, выполненную с учетом полученной дополнительной информации и с применением новых подходов к анализу данных.

Исходные данные и методика исследований. В работе [Разработка..., 2003] приведены 22 известные и апробированные зависимости затухания балльности сотрясений от магнитуды землетрясения и расстояния до очага $-I(M, D)$, полученные в разное время разными авторами для разных сейсмоактивных районов мира. В графическом виде эти зависимости показаны на рисунке 1.

С другой стороны, в работах [Разработка..., 2003; Чернов Ю., Чернов А., 2017] приведены полученные аналогичным образом (т.е. обобщением 32 отобранных из разных районов мира) зависимости пиковых амплитуд ускорений колебаний грунта от магнитуды землетрясения и расстояния до его очага. Графики этих зависимостей показаны на рисунке 2.

Статистическое сопоставление полученных на основе этих двух групп зависимостей оценок пиковых амплитуд ускорений (рис. 2), с одной стороны и балль-

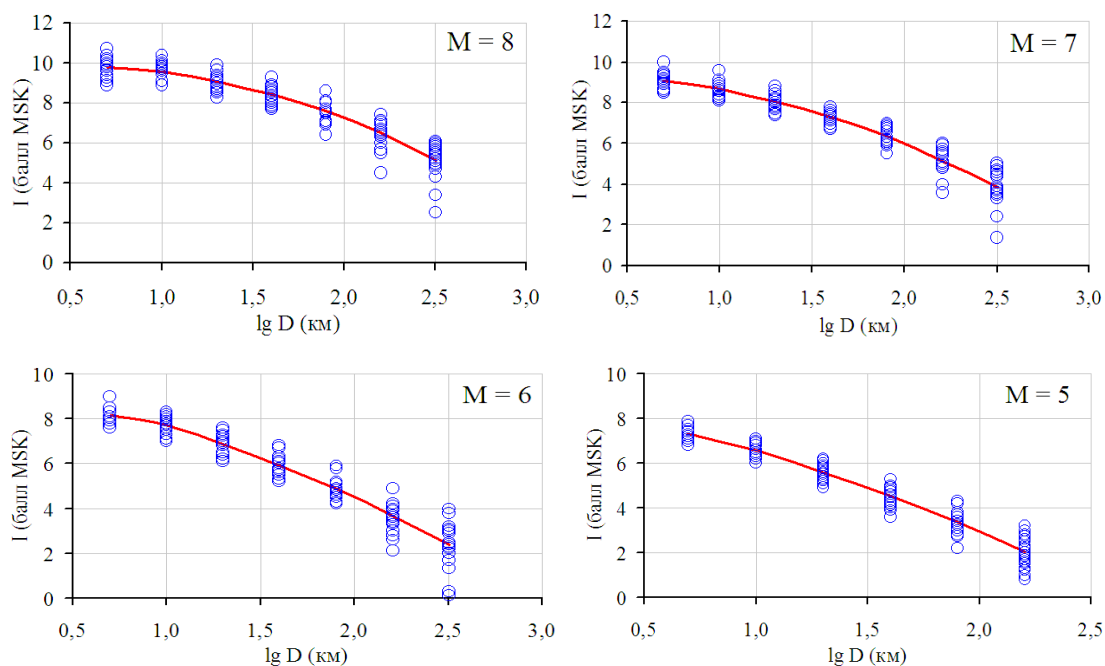


Рис. 1. Наиболее вероятные значения макросейсмических интенсивностей сотрясений (I) при землетрясениях с различными магнитудами M на разных расстояниях от очага D по данным разных исследований (синие кружки). «Средние» грунтовые условия. Красная линия – аппроксимирующая кривая (средние значения).

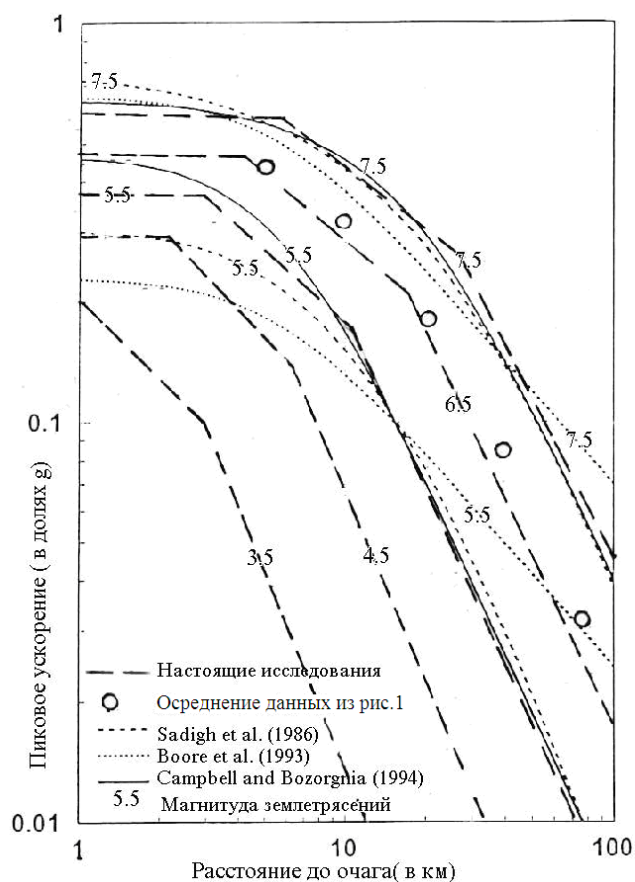


Рис. 2. Функции затухания пиковых ускорений колебаний грунта при землетрясениях разных магнитуд (среднемировые данные)

ности сотрясений (при одних и тех же M и D (рис. 1) с другой, дает возможность построить новую модель зависимости величин ускорений и соответствующих им балльностей.

Следует подчеркнуть, что каждая из показанных на рисунках 1 и 2 зависимостей, сама является обобщением сотен, а иногда и тысяч отдельных пар значений амплитуд колебаний и балльностей сотрясений с соответствующими M и D , что многократно увеличивает статистический объем анализируемой первичной информации и следовательно повышает надежность получаемых на ее основе результатов.

Статистические сопоставления выполнены в виде регрессионного анализа пар наиболее вероятных значений пиковых ускорений и балльностей, рассчитанных, соответственно, для магнитуд землетрясений $M = 5; 6; 6,5; 7;$ и 8 и расстояний до очага $D = 5; 10; 20; 40; 80; 160$ и 320 км. Значения пиковых ускорений для $M = 6,5$ – это средние оценки по 32 независимым оценкам [см. Разработка..., 2003; Чернов Ю., Чернов А., 2017]. Наиболее вероятные значения пиковых ускорений для $M=5; 6; 7$ и 8 рассчитаны по зависимостям (рис.2). Наиболее вероятные значения I для $M = 5; 6; 7$ и 8 взяты из рисунка 1 (средние значения), соответственно. Оценки балльностей для $M = 6,5$ получены интерполяцией соответствующих средних величин I , определенных для $M = 6$ и $M = 7$ (рис. 1). Помимо вышеуказанных данных в регрессионный анализ включены также наши дополнительные определения параметров сейсмических воздействий пиковых амплитуд и балльностей для ближних зон землетрясений с $M = 5; 6; 6,5; 7;$ и 8 [см. Разработка..., 2003].

Результаты и обсуждение. Расчеты проведены в два этапа. Сначала рассчитаны линейные регрессии $lg \alpha_{\max}$ на I , отдельно для землетрясений с $M = 4; 5; 6; 7$ и 8 (для $M = 4$ расчет выполнен методом экстраполяции). Получены следующие аппроксимирующие выражения:

$$\begin{aligned} lg \alpha_{\max} &= 0,328 I - 0,416 && \text{для } M=8; \\ lg \alpha_{\max} &= 0,372 I - 0,636 && \text{для } M=7; \\ lg \alpha_{\max} &= 0,383 I - 0,539 && \text{для } M=6; \\ lg \alpha_{\max} &= 0,395 I - 0,569 && \text{для } M=5; \\ lg \alpha_{\max} &= 0,405 I - 0,385 && \text{для } M=4, \end{aligned} \quad (1)$$

где α_{\max} – в см/с/с; I – в баллах шкалы MSK-64 или MM,

По этим выражениям видно, что при одних и тех же балльностях на близких расстояниях большие ускорения дают меньшие магнитуды землетрясений. Так, например, при $I = 9$ баллов MSK для магнитуды $M = 6$ ожидаемое пиковое ускорение $\alpha_{\max} \approx 0,809g$; для $M = 7$ – $\alpha_{\max} \approx 0,515g$; для $M=8$ – $\alpha_{\max} \approx 0,343g$. Аналогичным образом при $I=10$ баллов MSK для магнитуды $M = 7$ получаем $\alpha_{\max} \approx 1,213g$; для $M = 8$ – $\alpha_{\max} \approx 0,731g$.

Особенности полученных на первом этапе зависимостей (1) могут объясняться влиянием на наблюдаемый общий макросейсмический эффект землетрясений не только амплитудного уровня ускорений, но также длительности цуга колебаний и периода колебаний с максимальными амплитудами. Так по мере возрастания магнитуды землетрясения увеличиваются относительная длительность интенсивной

фазы колебаний и период пикового ускорения, вследствие чего растет их вклад в результирующую макросейсмическую интенсивность и соответственно уменьшается скорость возрастания α_{\max} при росте I . Подобные зависимости, учитывающие не только амплитудный уровень, но и длительности и периоды колебаний в виде функционалов рассматривались, например, в работе [Чернов, 1989]. В явном виде описанный эффект можно видеть в модернизированном нами функционале из [Чернов, 1989]:

$$I = (0,222M + 1,146) \lg PGA + 0,300 \lg T_a + 0,450 \lg \tau_{0,3} + 2,000 \quad (2)$$

В выражении (2) PGA (пиковое ускорение грунта) в см/с/с; T_a (период ускорения с максимальной амплитудой) и $\tau_{0,3}$ (длительность цуга ускорений с амплитудой не ниже 0,3 от максимальной) в с.

Вышеописанные оценки $\lg \alpha_{\max}$ для «предельных» и близких к ним интенсивностям сотрясений для магнитуд $M = 5-8$ также не отражены в вышеописанных исходных данных (рис. 1). Их неучет приведет к некоторому занижению прогнозируемых оценок пиковых ускорений при применяемой схеме анализа, поэтому эти «экстремальные» оценки также включены в общий массив исходных данных. Полученный массив оценок «среднемировых» наиболее вероятных значений $\lg \alpha_{\max}$ и I показан на рисунке 3.

На втором этапе по данному массиву рассчитаны кусочно-линейные и линейные аппроксимации:

$$\lg \alpha_{\max} = \begin{cases} 0,271I + 0,279 & \text{при } 7,5 \leq I < 11 \\ 0,384I - 0,568 & \text{при } 4,5 \leq I \leq 7,5 \\ 0,326I - 0,307 & \text{при } I \leq 4,5 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lg \alpha_{\max} = 0,345 I - 0,350 \quad (4)$$

В выражениях (3) – (4) α_{\max} – см/с/с; I – в баллах MSK-64 или MM.

В таблице 1 дано сопоставление оценок пиковых ускорений, выполненных по выражениям (3) с данными некоторых других исследований. Наши оценки по кусочно-линейной аппроксимации при низких интенсивностях ($I = 5-6$ баллов) достаточно хорошо корреспондируют с рекомендациями действующих строительных правил и методических рекомендаций [СП-14, 2014; Штейнберг и др., 1993], несколько (на 20-25%) выше оценок Ф. Ф. Аптикаева [2001] и значительно (в 2-3 раза) ниже оценок [Wald et al., 1999; Atkinson, Sonley, 2000]. Для землетрясений средней силы ($I = 7-8$ баллов) наилучшее соответствие наших оценок наблюдается с методическими рекомендациями [Штейнберг и др., 1993] и с данными Ф. Ф. Аптикаева [2001]. Оценки [Wald et al., 1999; Atkinson, Sonley, 2000] несколько сближаются с нашими, но по-прежнему остаются существенно (на 50-100%) выше. СНиП для данного диапазона интенсивностей рекомендуют ускорения на 30-40% ниже наших оценок. Для высоких интенсивностей ($I = 9-10$ баллов) наши оценки близки к методическим рекомендациям [Штейнберг и др., 1993] и значительно (до

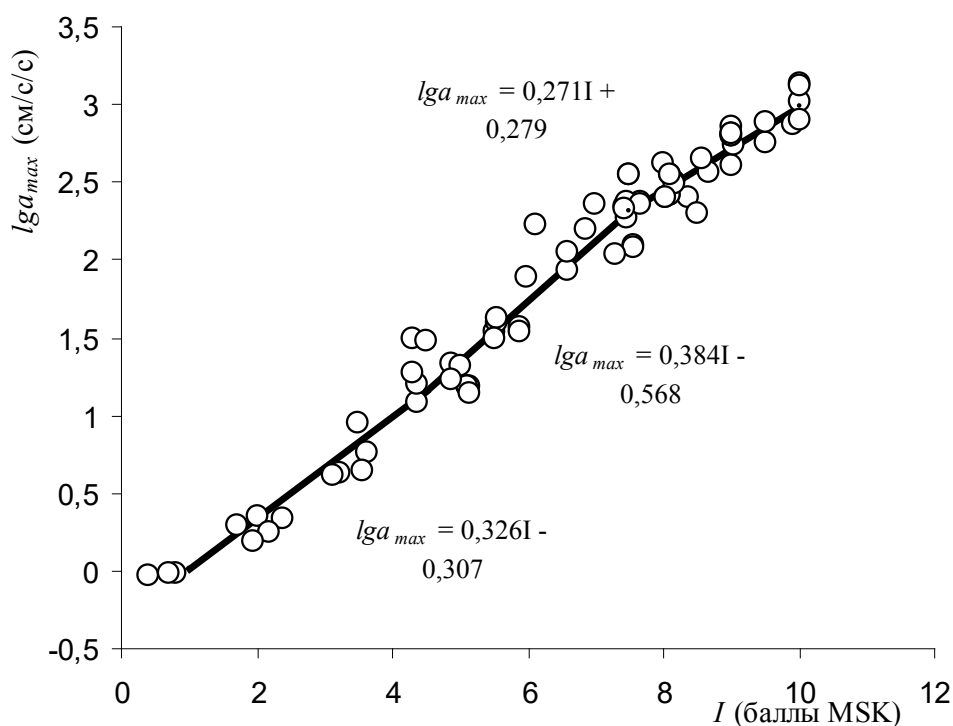


Рис. 3. Соотношения между пиковыми амплитудами ускорений и макросейсмическими интенсивностями сотрясений грунта.

Кружки – индивидуальные обобщенные оценки наиболее вероятных значений lga_{max} и I ; ломаная линия – кусочно-линейная аппроксимация.

Таблица 1.

Соотношения между макросейсмическими интенсивностями землетрясений (I) и наиболее вероятными пиковыми ускорениями (α_{max}) по данным различных исследований

I , балл MSK	α_{max} , см/с/с							
	Свод прав-ил..., 2014	Штейн-берг и др., 1993	Апти-ка-ев, 2001	Wald et.all, 1999	Atkin-son, Sonley, 2000	Ulo-mov et all., 1999	Настоящее исследо-вание	
							Кусочно-линейн.	Линейная
V	25	25	17,5	66	50	28	23	23
VI	50	60 –	44	124	100	60	54	52
VII	100	134	110	232	170	129	132	116
VIII	200	282	280	436	350	277	280	258
IX	400	566	700	818	700*	596	522	569
X	800	1000	1778	1533	-	1282	974	1259

100%) ниже рекомендаций [Аптикаев, 2001; Wald et al., 1999; Atkinson, Sonley, 2000].

В целом по всему диапазону интенсивностей можно сказать, что полученные по кусочно-линейной аппроксимации оценки α_{\max} настоящего исследования занимают «промежуточное» положение в сравнении с общим массивом других оценок, несколько более высокие, чем рекомендуемые действующими нормативами и более низкие, чем данные ряда последних исследований. Более низкие оценки, рекомендуемые нормативными документами связаны с тем, что в них под пиковыми ускорениями понимается не значение единичной максимальной амплитуды, как во всех остальных случаях, а некоторое максимальное «нормативное» ускорение, характеризующее средний уровень ускорений на наиболее интенсивной части записи. Такие «нормативные» ускорения в среднем составляют $\sim 0,75 PGA$ (пикового ускорения грунта) и $\sim 0,65 PHA$ (пикового горизонтального ускорения). Результаты более грубой линейной аппроксимации в настоящем исследовании по сравнению с кусочно-линейным вариантом дают несколько заниженные (на $\sim 15\%$) значения α_{\max} при $I = 7-8$ баллов и завышенные (до 25%) при $I = 9-10$ баллов.

Заключение

Подводя итог выполненным исследованиям можно резюмировать следующее:

1. Построение исследуемых зависимостей, не обычным путем статистического анализа совокупностей индивидуальных пар значений пиковых амплитуд и балльностей, а при помощи анализа уже построенных ранее по таким совокупностям достаточно большого набора статистических зависимостей позволило достаточно четко показать и количественно описать нелинейный характер зависимости (I).

2. В широком диапазоне интенсивностей (3-11 баллов MSK) связи балльности с пиковыми амплитудами ускорений лучше аппроксимируются кусочно-линейными функциями с различными коэффициентами регрессии. Линейные же соотношения могут давать существенные погрешности – например, завышение пиковых ускорений до 25% в области высоких баллов (9-11 баллов MSK) и занижение до $15-20\%$ в диапазоне средних и низких макросейсмических интенсивностей (3-7 баллов MSK).

3. Полученные оценки могут трактоваться как «среднемировые» и относящиеся к «средним» грунтовым условиям. При учете региональных и локальных факторов, таких как характеристики очагов и свойств среды распространения сейсмических волн, местные грунтово-геоморфологические условия и др., вышеописанные оценки могут корректироваться путем введения соответствующих поправочных коэффициентов.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия) // Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора наук. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – 47 с.

2. Разработка расчетных моделей сейсмических воздействий для строительного проектирования с учетом неопределенности и неполноты сейсмологических данных о спектральных и временных параметрах сейсмических движений грунта // Научн. руков. Ю.К. Чернов. Отчет о НИР. Фонды СКИГЦ Госстроя России. Государственный контракт № 16-05-06/03 от 10.06.2003 г. – Ставрополь. – 2003. – 142 с.

3. Чернов Ю. К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.
4. Чернов, Ю. К., Чернов А. Ю. Вероятностные модели сейсмических воздействий для прогнозирования сейсмической опасности в инженерных целях // Геология и геофизика юга России. – 2017. – №2. – С. 116-128.
5. Штейнберг В. В., Сакс М. В., Аптикаев Ф. Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М: Наука, 1993. – С. 5-94.
6. Aptikaev F. F. On the correlation of MM intensity with parameters of ground shaking // Proceedings VII Europ. Conf. Earthq. Eng. Greece. – 1981. – V. 2. – Pp. 117-126.
7. Boore D. M., Joyner W. B., Fumal T. E. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations from Western North American Earthquake // Interim Report. U. S. Geological Survey Open – File Report. – 1993. – Pp. 93-509.
8. Campbell K. W. and Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993 // Proceedings, Fifth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. – 1994. – Vol. III. – Pp. 283-292.
9. Eiby G. A. The assessment of earthquake felt instruments // Proceedings III World Conf. Earthq. Eng. – Wellington, N. S. – 1966.
10. Sadigh K., Egan J., and Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes 57:132. – 1986.
11. Ulomov V. I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. Vol. 42, N 6 December 1999. – Pp. 1023-1038.
12. Wald D. J., V. Quitoriano T. N., Heaton M. Eeri and Kanamori H. (1999). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. Earthquake Spectra. Vol.15, №3, August 1999. Pp. 557-564.

DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9510

MODELS FOR THE DESCRIPTION OF PEAK ACCELERATION RELATION ON THE GROUND SHAKING MACROSEISMIC INTENSITY

**© 2017 Yu. K. Chernov¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., A. Yu. Chernov², Sc.
Candidate (Tech.)**

¹Geophysical institute VSC RAS, Russia, 362002, RNO-Alania, Vladikavkaz, Markov Str., 93a, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Engineering institute in the North-Caucasian Federal University, Russia, 355029, Stavropol Krai, Stavropol, Kulakov str., 2

Models for estimating the probable peak accelerations using strong earthquakes ground macroseismic intensity have occurred or forecasted and vice versa, to estimate macroseismic intensity using acceleration data based on statistical analysis of large amounts of world accelerations data were offered.

It is shown, that in a wide range of intensities (3-11 MSK) the description of intensity dependence on ground motion peak accelerations amplitudes it is better fit piecewise-linear approximation with different regression coefficients.

When using common now linear correlations can occur, in particular, the underestimation of the peak accelerations in the range of medium and low macroseismic intensities (3-7 MSK) and, on the contrary, revaluation probable accelerations at high intensities (9-11 MSK).

Keywords: strong earthquake, peak acceleration of ground motion, macroseismic intensity, seismic impact, seismic hazard.

References

1. Aptikaev F.F. Sil'nye dvizheniya grunta pri zemletryaseniyaх (seismicheskie vozdeistviya). Diss dokt. [Strong earth motion during earthquakes (seismic impacts). Dr. sci. diss.]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2001. 47 p. (in Russian).
2. Razrabotka raschetnyh modelej seismicheskikh vozdeistvij dlya stroitel'nogo proektirovaniya s uchetom neopredelennosti i nepolnoty seismologicheskikh dannyh o spektral'nyh i vremennyh parametroh seismicheskikh dvizhenij grunta. Otchet o NIR [Development of computational models of seismic effects for construction design, taking into account the uncertainty and incompleteness of seismological data on the spectral and temporal parameters of seismic motions of soil, Scientific Report]. Fondy SKIGC Gosstroya Rossii. Gosudarstvennyj kontrakt №16-05-06/03 ot 10.06.2003 g. Stavropol', 2003. 142 p. (in Russian).
3. Chernov Yu.K. Sil'nye dvizheniya grunta i kolichestvennaya ocenka seismicheskoy opasnosti territorij [Strong soil motions and quantitative assessment of seismic hazard of territories]. Tashkent, FAN Publ., 1989. 295 p. (in Russian).
4. Chernov Yu.K., Chernov A.Yu. Veroyatnostnye modeli seismicheskikh vozdeistvij dlya prognozirovaniya seismicheskoy opasnosti v inzhenernyh celyah [Probabilistic models of seismic actions for forecasting seismic hazard for engineering purposes]. Geologiya i geofizika Yuga Rossii, 2017, No. 2, pp. 116–128. (in Russian).
5. Shtejnberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. i dr. Metody ocenki seismicheskikh vozdeistvij (posobie) [Methods for estimating seismic impacts (guide)]. Voprosy inzhenernoj seismologii, Issue 34. Moscow, Nauka Publ, 1993, pp. 5–94. (in Russian).
6. Aptikaev F.F. On the correlation of MM intensity with parameters of ground shaking // Proceedings VII Evrop. Conf. Earthq. Eng. Greece, 1981, V. 2, pp. 117–126.
7. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations from Western North American Earthquake. Interim Report. U.S. Geological Survey Open – File Report. – 1993, pp. 93–509.
8. Campbell K.W. and Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993. Proceedings, Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 1994, Vol. III, pp. 283–292.
9. Eiby G.A. The assessment of earthquake felt instruments. Proceedings III World Conf. Earthq. Eng. Wellington, N. S., 1966.
10. Sadigh K., Egan J., and Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes 1986, 57:13 2.
11. Ulomov V.I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica, 1999, Vol. 42, No 6, pp. 1023–1038.
12. Wald D.J., V. Quitoriano T.N. Heaton M. Eeri and Kanamori H. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. Earthquake Spectra, 1999, Vol.15, No. 3, pp. 557–564.