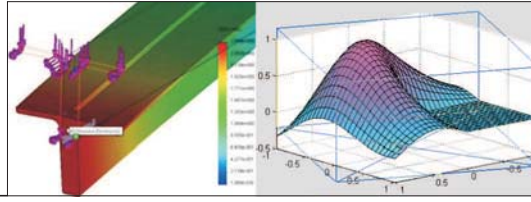


НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 624.131.5

Х.Р. ЗАЙНУЛАБИДОВА

ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ*

Рассмотрены зависимости ускорений и преобладающих периодов колебаний грунтов от магнитуд и эпицентральных расстояний землетрясений с целью применения полученных результатов для территорий с неопределенной сейсмологической ситуацией. Исследования проводились на основе анализа инструментальных записей землетрясений, зарегистрированных в различных регионах мира аналитическими и численными методами статистических испытаний. В результате предложены графики зависимости максимальных ускорений колебаний грунтов и соответствующих им периодов колебаний от магнитуд и эпицентральных расстояний, а также аналитические выражения, наиболее точно описывающие ускорения и соответствующие им периоды колебаний грунтов на поверхности. Показано, что с увеличением эпицентральных расстояний повышаются преобладающие периоды колебаний грунтов, что в свою очередь влияет на вид сейсмоизоляции зданий и сооружений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сейсмичность, параметры очагов землетрясений, ускорения колебания грунтов, эпицентральное расстояние.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-722-2-110-120

Сильные землетрясения все еще остаются одним из самых страшных стихийных бедствий на Земле. В среднем в год в мире от землетрясений погибает 10 000 человек, а материальный ущерб в среднегодовом исчислении доходит до 400 млн долларов [1]. Более 50 % территории России подвержены влиянию землетрясений, вызывающих серьезный ущерб. Оценка сейсмической опасности территорий позволяет уточнить прогнозируемые параметры землетрясений, что необходимо для обеспечения сейсмостойкости проектируемых зданий и сооружений. Одна из основных характеристик очага землетрясения – магнитуда. Зная параметры очаговых зон (магнитуда, эпицентральное расстояние, глубина очага), можно определить интенсивность землетрясения на поверхности.

Исследования инструментальных записей землетрясений показывают, что наиболее объективные результаты мы получаем на плотных скальных грунтах, так как они по составу однородны [1, 2]. Запись сильных землетрясений осуществляется сейсмографами и акселерографами, при этом величины ускорений колебаний грунтов определяют для расчета сейсмических нагрузок при помощи уравнения движения грунта [1]

* Исследования проводились при поддержке гранта главы Республики Дагестан, полученного в 2018 г.

$$\ddot{Y} + 2\xi\dot{Y} + \omega^2 Y = -\ddot{Y}_{\text{осн}},$$

где $\ddot{Y}_{\text{осн}}$ – ускорения колебания грунта;

ξ – относительный коэффициент демпфирования;

ω – частота собственных колебаний системы при отсутствии демпфирования;

Y – упругое смещение осциллятора.

В работе изучались инструментальные записи акселерограмм землетрясений [3–18], в том числе Спитакского (07.12.1988 г.), Сахалинского (28.05.1995 г.), Шикотанского (24.05.2013 г.) и др. Исследовались записи землетрясений на скальных грунтах с интенсивностью колебаний от 4 до 9 баллов, магнитудах в интервале 4,1–7,2 и эпицентральных расстояний Δ от 10 до 100 км. Землетрясения были зарегистрированы акселерографами RFT-250, разработанными в США. Диапазон чувствительности акселерографов равен 2,5–3,5 см на 0,1 г. Ускорения регистрировались без существенных искажений (не более 10 %) в диапазоне периодов от 0,1 с до нескольких секунд. Общие сведения о землетрясениях приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики землетрясений

Район	Число наблюдений	Магнитуда	Эпицентральное расстояние Δ , км	Глубина очага H , км
Камчатка	15	4–8	40–150	25–50
Мексика	5	5–7	60–300	20–70
Япония	15	7,0–7,5	10–30	30–45
Запад США	55	4,0–7,5	10–400	10–35
Кавказ	25	4,5–6,7	10–100	10–40

На рис. 1 показаны распределения максимальных амплитуд ускорений и соответствующих им преобладающих периодов колебаний грунтов от общего числа исследованных записей.

Диаграмма распределения преобладающих периодов колебаний грунтов в количественном выражении имеет вид близкий нормальному. Наибольшее количество землетрясений происходит с преобладающими периодами колебаний в диапазоне 0,1–0,4 с. Для построения графиков, приведенных на

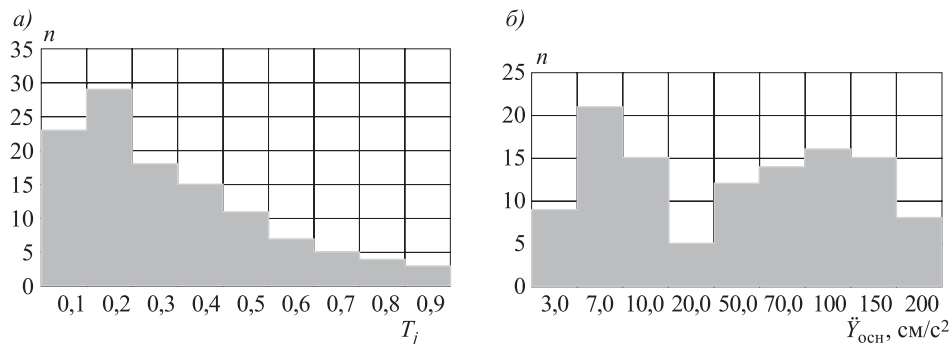


Рис. 1. Распределение максимальных амплитуд ускорений (а) и преобладающих периодов колебаний грунтов (б)

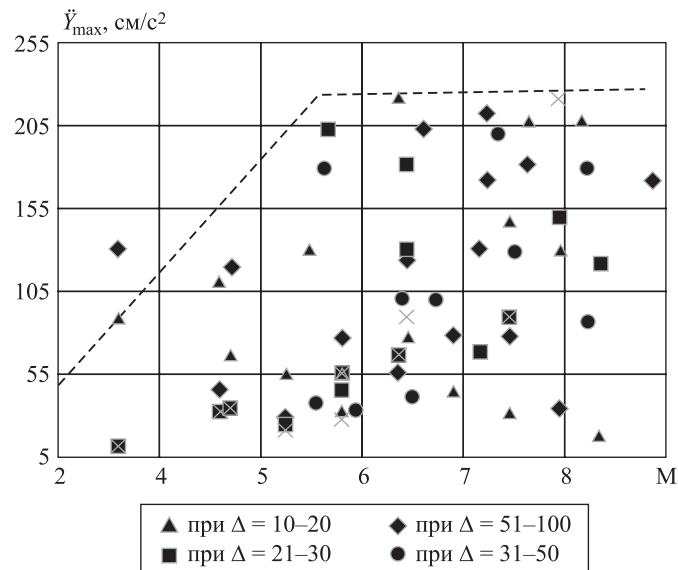


Рис. 2. Зависимость максимальных амплитуд ускорений колебаний скальных грунтов \ddot{Y}_{\max} от магнитуд землетрясений M

рис. 1, использованы данные без учета рельефа местности. На рис. 2 представлены зависимости амплитуд ускорений от магнитуд и гипоцентральных расстояний на скальных грунтах. Характерным для зависимости $a_{\max} = f(M)$ является большой разброс значений, если рассматривать весь массив, не разделяя на диапазоны по эпицентральных расстояниям. Поэтому записи землетрясений разделены на группы по критерию эпицентрального расстояния: 1-я группа – $\Delta = 10-20$, 2-я – $\Delta = 21-30$, 3-я – $\Delta = 31-50$, 4-я – $\Delta = 51-100$ км.

На рис. 2 вид огибающей указывает на увеличение амплитуд ускорений с ростом магнитуд в диапазоне 4–6, в дальнейшем амплитуды ускорений, достигая 250–300 см/с², не повышаются при увеличении магнитуд. Выше огибающей лежат амплитуды ускорений землетрясений, равные 500 см/с², зарегистрированные при землетрясении в Спитаке 1988 г. ($M = 7$, $\Delta = 0$, $J = 9-10$ баллов), Парквильдском землетрясении 1966 г. ($M = 5,6$, $\Delta = 0$) – 350 см/с², в Сан-Фернандо – 1971 г. ($M = 6,6$ и $\Delta = 29$ км) – 400 см/с². Однако на скальных грунтах (гранит) зарегистрированы ускорения колебаний грунтов 160–170 см/с² при землетрясениях с $M = 6,6$ и $\Delta = 15$ км [19]. Заключительная часть кривой проведена при малом количестве данных с $M \geq 7$ и $\Delta < 16$ км. Большой разброс и не очень четкая тенденция роста преобладающих периодов колебаний грунта при увеличении магнитуды M показаны на рис. 3. В диапазоне M от 4 до 7 и эпицентральных расстояний $\Delta = 6-100$ км более 90 % значений периодов лежат в интервале 0,1–0,9 с и только на очень больших расстояниях колебания становятся длиннопериодными с $T = 1-2$ с.

На рис. 4 показаны графики зависимостей максимальных амплитуд ускорений a и периодов T от магнитуды для разных диапазонов эпицентральных расстояний. При изучении максимальных ускорений колебаний грунтов и преобладающих периодов колебаний в узких интервалах эпицентральных расстояний разброс значений незначительный (5–6 раз) на расстояниях до

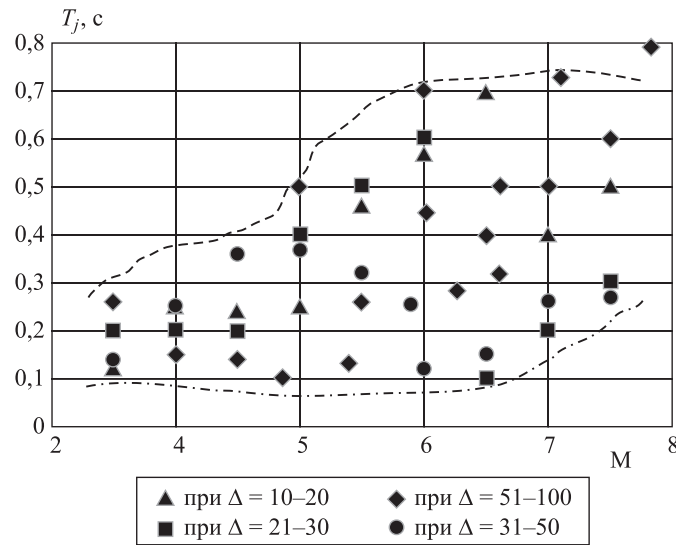


Рис. 3. Зависимость преобладающих периодов колебаний грунтов от магнитуды землетрясений M

80 км, с увеличением эпицентральных расстояний ($\Delta \geq 80$ км) разброс возрастает (9–10 раз). Выражения для определения максимальных ускорений колебаний грунтов в зависимости от магнитуды в определенных диапазонах эпицентральных расстояний рассчитаны эмпирически.

Максимальные ускорения колебания грунтов в зависимости от магнитуды:

Эпицентральное расстояние Δ , км	Зависимость a_{\max} , см/с ²
10–20	$a_{\max} = e^{0,78+0,76 M}$
21–30	$a_{\max} = e^{0,72+0,79 M}$
31–50	$a_{\max} = e^{0,8+0,77 M}$
51–100	$a_{\max} = e^{1,64+0,4 M}$

Из рис. 4 следует, что активный рост амплитуд ускорений колебаний грунтов происходит на близких расстояниях ($\Delta \leq 20$ км), при этом с повышением магнитуды на единицу амплитуды ускорений увеличиваются в 4–5 раз, а на больших расстояниях – более чем в 10 раз. Таким образом, с ростом магнитуды на дальних расстояниях ускорение увеличивается вдвое быстрее, чем на близких. В интервале средних эпицентральных расстояний ($\Delta = 21–50$ км) наблюдается рост периода ускорений колебаний с увеличением магнитуды, но имеется значительный разброс значений. На близких ($\Delta = 10–20$ км) и дальних расстояниях ($\Delta = 51–100$ км) такая зависимость не наблюдается. При определении зависимостей $a = f(M)$ и расчете дисперсии ускорений не оценивалась возможная дисперсия величины магнитуды.

Далее исследовалось влияние эпицентральных расстояний на амплитуды колебаний грунта и преобладающие периоды колебаний (рис. 5).

Для выявления дисперсии данных рассмотрены зависимость ускорений a и периодов T от эпицентральных расстояний Δ в диапазонах магнитуд 7,0–7,2; 6,0–6,6; 5,3–5,9 и 4,1–4,5.

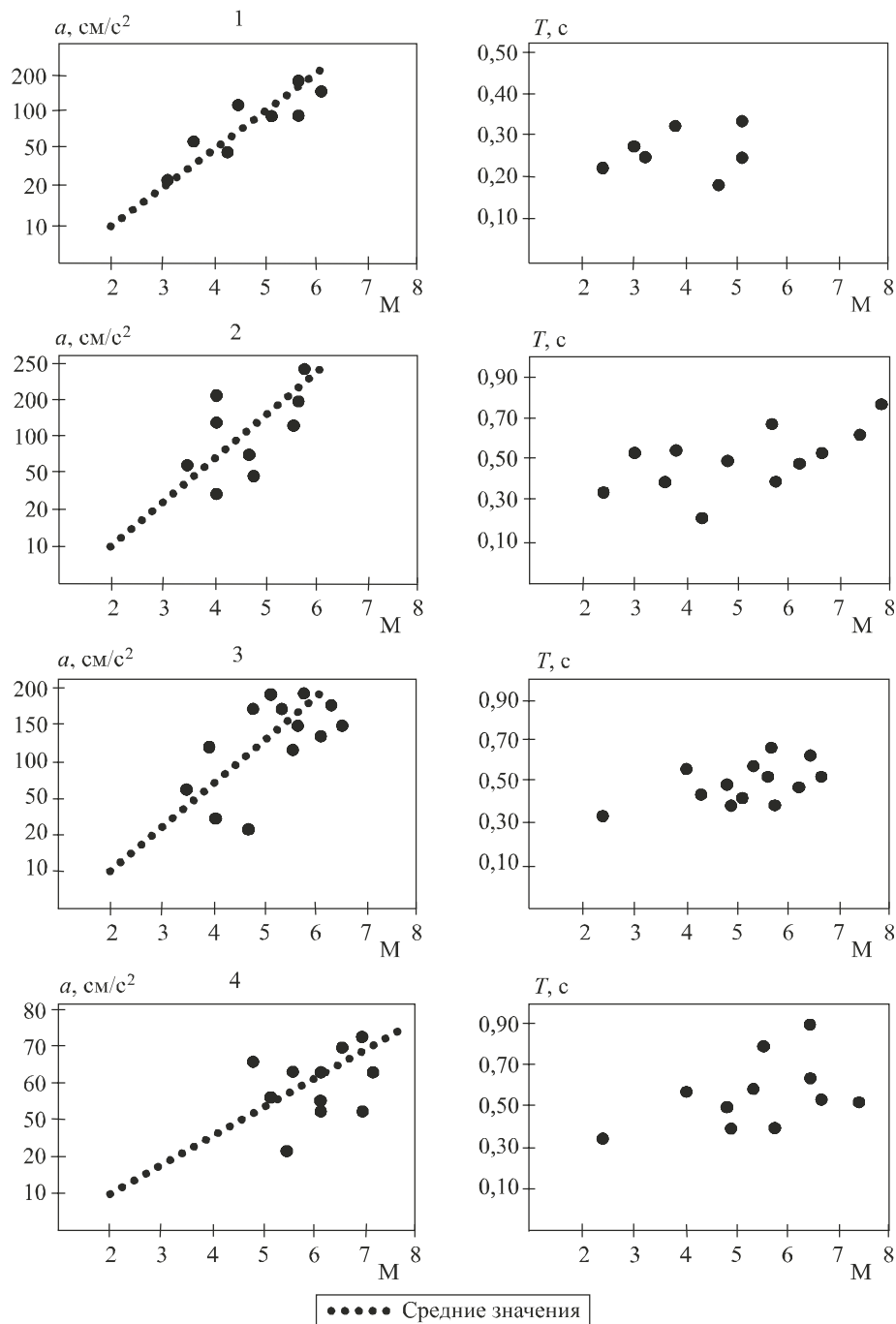


Рис. 4. Зависимость максимальных амплитуд ускорений a и преобладающих периодов колебаний грунтов T от магнитуд M и эпицентральных расстояний Δ
 1 – $\Delta = 10\text{--}20$ км; 2 – $\Delta = 21\text{--}30$ км; 3 – $\Delta = 31\text{--}50$ км; 4 – $\Delta = 51\text{--}100$ км

Графики на рис. 5 наглядно демонстрируют быстрое убывание амплитуд ускорений на больших эпицентральных расстояниях, но в то же время существует слабая зависимость амплитуд ускорений на малых расстояниях.

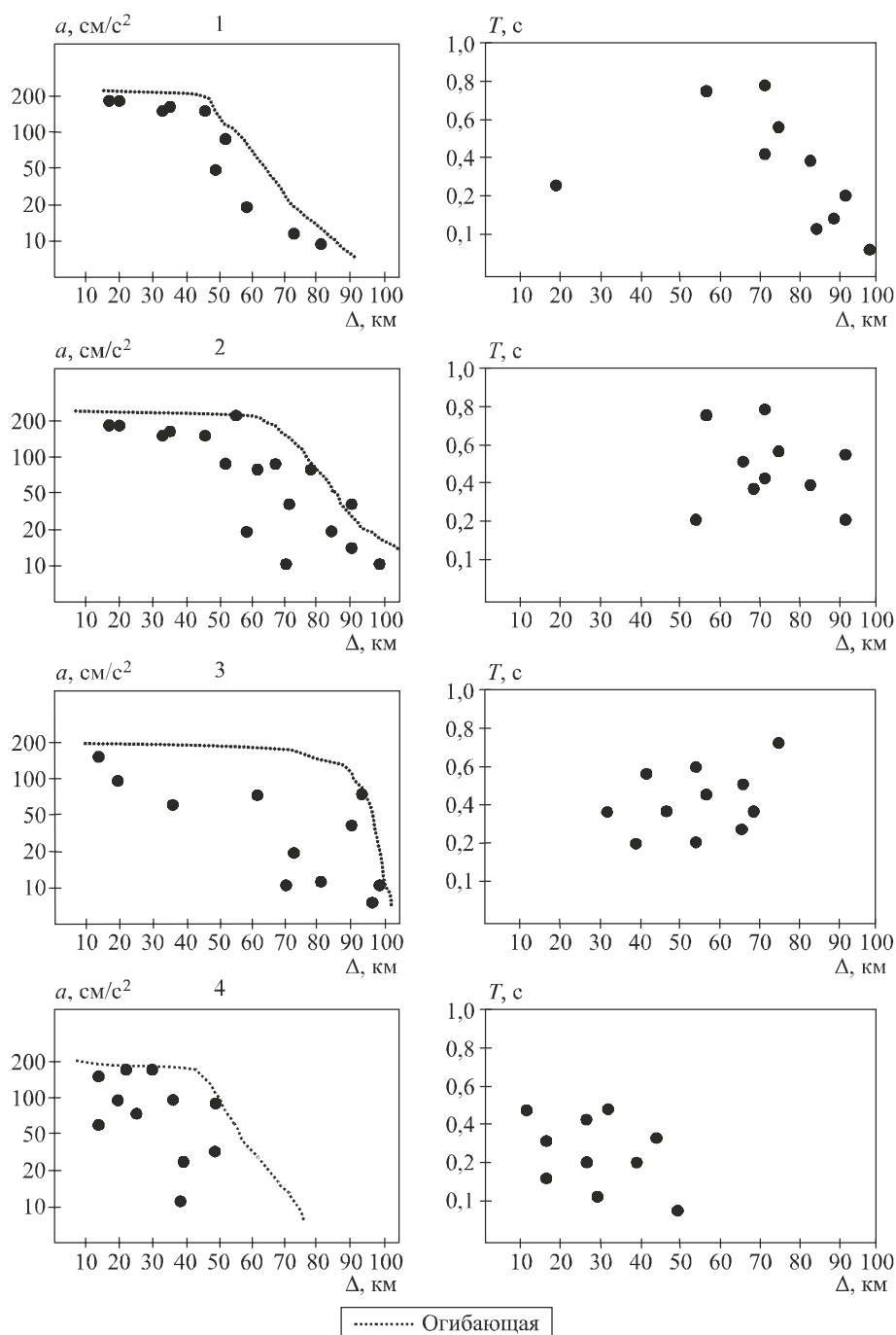


Рис. 5. Зависимость максимальных амплитуд ускорений a и преобладающих периодов колебаний грунтов T от эпицентральных расстояний Δ
 1 – $M = 7,0-7,2$; 2 – $M = 6,0-6,6$; 3 – $M = 5,3-5,9$; 4 – $M = 4,1-4,5$

На рис. 6 и 7 показаны обобщенные графики зависимости преобладающих периодов и ускорений колебаний от эпицентральных расстояний.

Приведенные на рис. 7, а обобщенные данные зависимости максимальных ускорений колебаний грунтов от магнитуд и эпицентральных расстояний

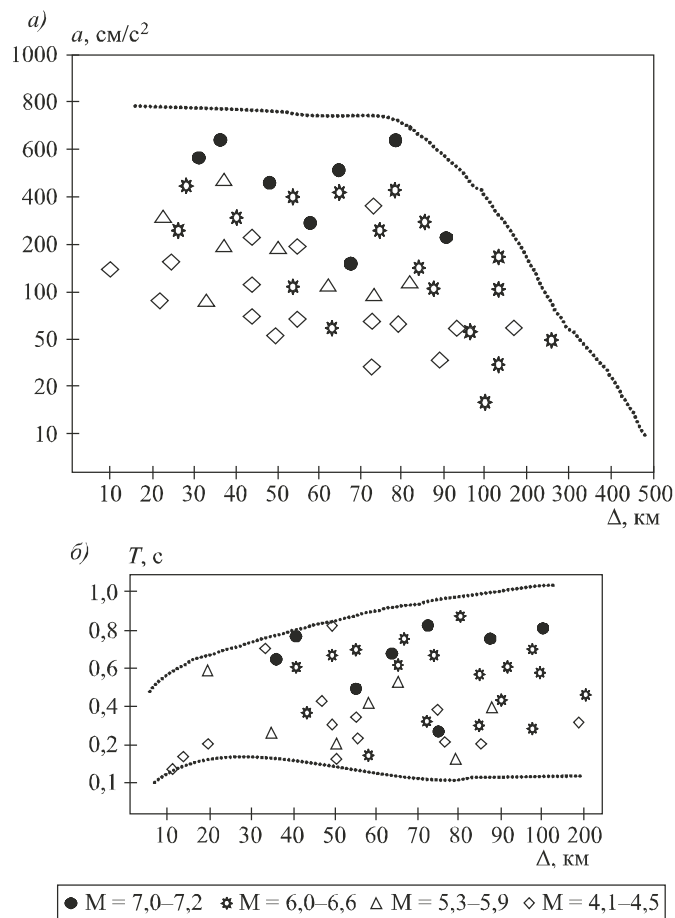


Рис. 6. Зависимость максимальных амплитуд ускорений (a) и преобладающих периодов колебаний грунтов T (δ) от эпицентральных расстояний Δ

ний показывают, что с увеличением магнитуд кривые сдвигаются в область больших эпицентральных расстояний. Периоды максимальных ускорений растут с увеличением эпицентральных расстояний (рис. 7, δ), хотя дисперсия значительна, особенно на больших расстояниях. По результатам анализа амплитуд ускорений и периодов колебаний грунтов построены кривые возможных максимальных амплитуд для магнитуд в интервале от 4,1 до 7,2 и эпицентральных расстояний от 10 до 100 км (см. рис. 7), а в табл. 2 приведены параметры огибающих кривых.

Наиболее интересным результатом работы является различный характер зависимости амплитуд ускорений от эпицентрального расстояния и магнитуд в разных диапазонах расстояний. На малых расстояниях замечено, что величины амплитуд ускорений не зависят от магнитуд от 6 до 7,1.

Такие результаты можно объяснить следующим. При землетрясении происходит разрыв поверхности земной коры, его форма и направление могут быть разными. Разрыв может распространяться в разные стороны, в том числе и по направлению точки наблюдения. Поэтому присутствует значительный разброс данных при исследовании зависимости амплитуд ускорений

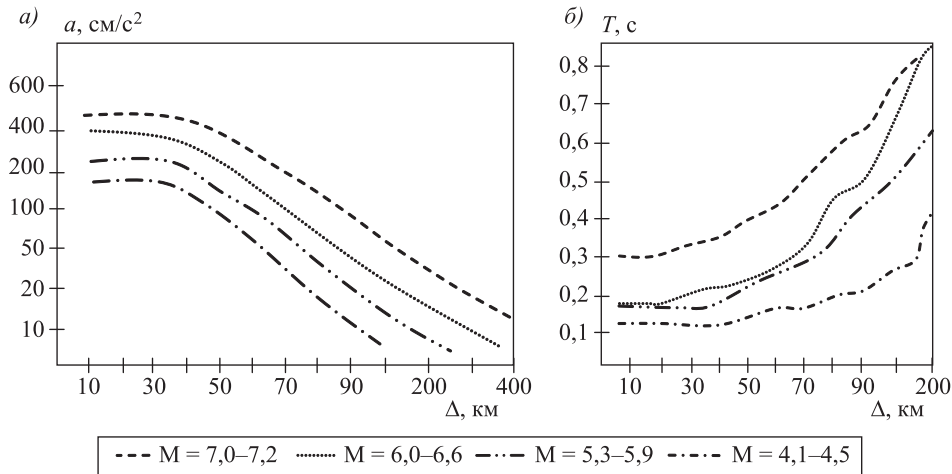


Рис. 7. Зависимость максимальных амплитуд ускорений a_{\max} (а) и зависимость преобладающих периодов колебаний грунтов T (б) от эпицентральных расстояний Δ и магнитуд M

Таблица 2. Аналитические выражения для описания огибающих ускорений и преобладающих периодов колебаний грунтов

Интервал магнитуд	Максимальные ускорения колебаний грунтов a_{\max} , см/с ²	Аналитические выражения огибающих, определяющие максимальные ускорения, см/с ²	Коэффициент детерминации выражения	Коэффициент корреляции	Аналитические выражения огибающих, определяющие преобладающие периоды колебаний грунтов T , с
4,1–4,5	180	$a_{\max} = e^{6,1+(-0,046\Delta)}$	0,81	0,9	$T_j = e^{-2,62+(0,01\Delta)}$
5,3–5,9	220	$a_{\max} = e^{6,09+(-0,0134\Delta)}$	0,77	0,88	$T_j = e^{-1,86+(0,01\Delta)}$
6,0–6,6	400	$a_{\max} = e^{6,09+(-0,0134\Delta)}$	0,77	0,88	$T_j = e^{-1,93+(0,01\Delta)}$
7,0–7,2	420	$a_{\max} = e^{6,28+(-0,012\Delta)}$	0,73	0,85	$T_j = e^{-1,41+(0,01\Delta)}$

от эпицентральных расстояний. Если эпицентральное расстояние меньше длины разрыва, направленного в сторону точки наблюдения, то она (точка наблюдения) находится над разрывом (эпицентром). И на протяжении всего разрыва амплитуды ускорений будут меняться незначительно.

Независимость амплитуд ускорений на близких расстояниях от магнитуд можно объяснить тем, что интенсивность колебаний определяется участком разрыва, ближайшим к точке наблюдения. Уменьшение затухания амплитуд колебаний с расстоянием при увеличении магнитуды вызвано сдвигом спектра колебаний в низкочастотную область с повышением энергии очага.

На основе исследований построены кривые зависимости амплитуд ускорений и соответствующих им периодов колебаний от магнитуд и эпицентральных расстояний. Используя полученные зависимости, можно определить ускорения и периоды колебаний грунтов, если известны магнитуда и эпицентральное расстояние возможного землетрясения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М.: Высш. шк., 1983. 306 с.
2. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 284 с.
3. Shebalin N.V., Tatevosyan R.E. Catalog of strong earthquakes ($M \geq 6$) for the global seismic hazard assessment program test area "Caucasus" / Historical and Prehistorically earthquakes in the Caucasus. Edited by D.Giardind and S.Balassanian. NATO ASI Series. Dordrecht, 1997. Vol. 28. P. 210–232.
4. Bulletin of the International Seismological Centre, 1979. Newbury, Berkshire, United Kingdom, 1980–1981.
5. Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.) Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. 536 с.
6. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (eds.) New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1977. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-31, (English translation of Russian original), Boulder, Colorado, USA, 1982. 608 p.
7. J.M.V AN Gll., S and G.LEYDECKER (editors): Catalogue of European earthquakes with intensities higher than 4. EUR 13406 EN (1991).
8. Satake K., Sawai Y., Shishikura M., Okamura Y., Namegaya Y., Yamaki S. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation // American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract T31G-03.
9. Anderson J.G., Brune J.N., Prince J., Singh S.K., Quas R. & Onate M. Strong ground motion from the Mochoacan, Mexico, Earthquake // Science (American Association for the Advancement of Science). 1968. Vol. 233, No. 4768. P. 1043.
10. Bani-Hani K.A., Malkawi A.I. A multi-step approach to generate response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2017. Vol. 97. P. 117–132.
11. Vrochidou E., Alvanitopoulos P., Andreadis I., Elenas A., Mallousi K. HHT-Based artificial seismic accelerograms generation // IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2014: Artificial Intelligence Applications and Innovations. 2014. P. 476–486.
12. Li Zh., Kotronis P., Wu H. Simplified approaches for Arias Intensity correction of synthetic accelerograms // Bulletin of Earthquake Engineering. 2017. March. P. 1–21.
13. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1981. Vol. 71, No. 6. P. 2039–2070.
14. Boore D.M., Joyner W.B., Oliver A.A. III, Page R.A. Peak acceleration, velocity and displacement from strong-motion records // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1980. No. 70. P. 305–321.
15. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Washington, D. C. 452 p.
16. Арефьев С.С., Дорбат К. Нефтегорское землетрясение 1995 г.: Томография очаговой зоны // Физика Земли. 2001. № 2. С. 58–68.
17. Арефьев С.С., Tatevosyan P.Э. Структура и сейсмический режим очаговой зоны Спитакского землетрясения // Физика Земли. 1991. № 11. С. 74–85.
18. Abe K. Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980 // Earth Planet. Inter. 1981. Vol. 27. P. 72–92.
19. Жалковскый Н.Д. Алтай и Саяны // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. С. 499–500.

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, канд. техн. наук, доцент
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала

Получено после доработки 14.01.19

Zajnulabidova Hanzada Raupovna, PhD, Ass. Professor
Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

THE PARAMETERS OF THE OSCILLATIONS OF ROCKY SOILS DURING EARTHQUAKES OF VARYING INTENSITY

Examines the degree of relationship between accelerations and predominant periods of ground fluctuations from the magnitudes and epicentral distances of earthquakes with the aim of applying the results to areas with uncertain seismic situation. The research was carried out on the basis of analysis of instrumental records of earthquakes registered in different regions of the world by analytical and numerical methods of statistical tests available to the author. As a result of the research, the graphs of the dependence of the maximum acceleration of soil vibrations and the corresponding periods of oscillations on the magnitudes and epicentral distances are proposed, as well as analytical expressions that most accurately describe the acceleration and the corresponding periods of soil and surface oscillations. It is shown that with the increase of epicentral distances the indicators of the prevailing periods of soil fluctuations increase, which in turn affects the nature of the seismicity of the territories and, consequently, the type of seismic isolation of buildings and structures.

Key words: seismicity, focal parameters of earthquakes, the acceleration fluctuations of the soil, epicentral distance.

REFERENCES

1. Polyakov S.V. Seysmostoykie konstruktsii zdaniy [Seismic stability structures of buildings]. Moscow, 1983. 306 p. (in Russian)
2. Medvedev S.V. Inzhenernaya seysmologiya [Engineering seismology]. Moscow, 1962. 284 p. (in Russian)
3. Shebalin N.V., Tatevosyan R.E. Catalog of strong earthquakes ($M \geq 6$) for the global seismic hazard assessment program test area "Caucasus". Historical and Prehistorical earthquakes in the Caucasus. Edited by Giardina D. and S. Balassanian. NATO ASI Series. Dordrecht, 1997. Vol. 28. Pp. 210–232.
4. Bulletin of the International Seismological Centre, 1979. Newbury, Berkshire, United Kingdom, 1980–1981.
5. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (ed.) Novyy katalog sil'nykh zemletryaseniy na territorii SSSR s drevneyshikh vremen do 1975 g. [New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times to 1975]. Moscow, 1977. 536 p. (in Russian)
6. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (eds.). New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1977. World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-31, (English translation of Russian original), Boulder, Colorado, USA, 1982. 608 p.
7. J.M.V AN Gill, S and G.LEYDECKER (editors): Catalogue of European earthquakes with intensities higher than 4. EUR 13406 EN (1991).
8. Satake K., Sawai Y., Shishikura M., Okamura Y., Namegaya Y., Yamaki S. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract T31G-03.

9. Anderson J.G., Brune J.N., Prince J., Singh S.K., Quaas R. & Onate M. Strong ground motion from the Mochoacan, Mexico, Earthquake. *Science* (American Association for the Advancement of Science). 1968. Vol. 233, No. 4768. P. 1043.
10. Bani-Hani K.A., Malkawi A.I. A multi-step approach to generate response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 97. Pp. 117–132.
11. Vrochidou E., Alvanitopoulos P., Andreadis I., Elenas A., Mal-lousi K. HHT-Based artificial seismic accelerograms generation. *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2014: Artificial Intelligence Applications and Innovations*. 2014. Pp. 476–486.
12. Li Zh., Kotronis P., Wu H. Simplified approaches for Arias Intensity correction of synthetic accelerograms. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017. March. Pp. 1–21.
13. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1981. Vol. 71, No. 6. Pp. 2039–2070.
14. Boore D.M., Joyner W.B., Oliver A.A. III, Page R.A. Peak acceleration, velocity and displacement from strong-motion records. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1980. No. 70. Pp. 305–321.
15. San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971. Washington, D.C. 452 p.
16. Arefiev S.S., Dorbat K. Neftegorskoe zemletryasenie 1995 g.: Tomografiya ochagovoy zony [Neftegorsk earthquake, 1995: imaging of the focal zone]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. 2001. No. 2. Pp. 58–68. (in Russian)
17. Arefiev S.S., Tatevosyan R.E. Struktura i seismicheskiy rezhim ochagovoy zony Spitakskogo zemletryaseniya [Structure and seismic regime of the focal zone of the Spitak earthquake]. *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. 1991. No. 11. Pp. 74–85. (in Russian)
18. Abe K. Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Earth Planet. Inter.* 1981. Vol. 27. Pp. 72–92.
19. Zhalkovskiy N.D. Altay i Sayany [Altai and Sayan]. *Novyy katalog sil'nykh zemletryaseniy na territorii SSSR* [New catalogue of strong earthquakes in the USSR]. Moscow, 1977. Pp. 499–500. (in Russian)