

УДК 699. 841

А.Д. Абакаров, Х.Р. Зайнулабидова, И.Б. Курбанов
МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ Г. МАХАЧКАЛЫ

A.D. Abakarov, H.R. Zaynulabidova, I.B. Kurbanov
SEISMIC MODEL FOR IMPACT, MAKHACHKALA

Проанализирована сейсмологическая обстановка территории г. Махачкалы. С учётом магнитуд очагов землетрясений и периодов повторяемости сейсмических воздействий получена усреднённая оценка периода повторяемости сейсмических событий в г. Махачкале. Установлены максимальные и расчётные ускорения колебания грунтов разных категорий в г. Махачкале, приведённые к повторяемостям землетрясений, рассмотренных картах ОСР-97. Предложен алгоритм расчёта и разработаны синтезированные акселерограммы для г. Махачкалы. Получен усреднённый график коэффициентов динамичности, учитывающий сейсмологические особенности территории г. Махачкалы.

Ключевые слова: *Землетрясение, повторяемость, ускорения, преобладающие периоды, акселерограмма, коэффициент динамичности*

Examined the seismic conditions the territory of Makhachkala. Taking into account the magnitude of earthquakes and seismic impacts obtained periods of occurrence of the mean score of period frequency of seismic events in the city of Makhachkala. Set maximum and computational acceleration hesitation soils of different categories in the city of Makhachkala, published by repeatability earthquakes, studied maps of the SRF-97. The algorithm of calculation and morphed to akselerogrammy, Makhachkala. Received average schedule that takes into account the dynamic coefficients of seismological features of the researched territory

The Keywords: *earthquake, repeatability, speed, predominant periods, akselerogramma, coefficient of dynamic*

Разработка региональных норм проектирования предполагает в первую очередь создание региональной модели сейсмического воздействия. Региональная модель сейсмического воздействия, прежде всего, включает региональные спектральные кривые для расчёта сейсмических нагрузок на объекты массового строительства и пакет расчётных акселерограмм для расчёта сейсмостойкости сооружений повышенной ответственности и сооружений со специальной сейсмозащитой. Основой для построения региональной модели сейсмического воздействия, наряду с историческими сведениями и записями землетрясений, служат геологические, геоморфологические, а также тектонические данные исследуемого района. Согласно карте эпицентров землетрясений Северного Кавказа (рис.1) [1] изучаемая территория входит в кайнозойский или предгорный тектонический комплекс, ограниченный с севера равнинным, а с запада горными тектоническими комплексами. Наиболее крупным тектоническим элементом района является область Дагестанского клина, который представляет собой сложный узел глубинных разломов разных направлений. Здесь близко сходятся глубинные разломы общекавказской ориентировки, пересекающиеся с Гудермесско-Моздокским сдвигом и серией поперечных разломов. С севера и с востока область Дагестанского клина оконтурена передовым Терско - Каспийским краевым прогибом, переходящим на юге в Кусаро - Дивический передовой прогиб. Восточная часть Дагестанского клина непосредственно примыкает к территории г. Махачкалы и подразделяется на два различных района: южный предгорный и северный - равнинный. Эта территория разделяется на ряд относительных поднятий, в пределах которых мощность отложений

значительно сокращается. Самая восточная из них включает в себя махачкалинскую брахиантиклинальную складку, расположенную непосредственно на территории города. Таким образом, из всего этого можно сделать вывод, что сильные землетрясения в городе Махачкале могут вызвать местные и близкие очаги, приуроченные к Дагестанскому клину с магнитудой 6.0-7.0 и эпицентральной расстоянием до 40 км. Вблизи г. Махачкалы находятся две крупные очаговые зоны, которые неоднократно проявлялись в течение двух веков [1]. Первая очаговая зона расположена восточнее от города (в Каспийском море) на расстоянии 30 км с максимальной магнитудой $M=6$ и глубиной очага 10 км. Вторая зона расположена западнее города на расстоянии 40 км с максимальной магнитудой $M=6.7-7$, глубиной очага 15 км. Повторяемость землетрясений класса $K=15(M=6)$ -35 лет, $K=16(M=6.7)$ -85 лет, $K=17(M=7)$ - 220 лет. С 1830 по 1974 годы в первой очаговой зоне произошло одно землетрясение с максимальной магнитудой $M=5.8$. Во второй очаговой зоне за этот же период произошло два крупных землетрясения с магнитудой $M=7$ и $M=6.8$. Исходя из этих данных, для очаговой зоны 1 округлённо можно принять повторяемость землетрясений класса $K=15$ равной 200 лет. Приведённые выше повторяемости землетрясений класса $K=16$ и $K=17$ соответствуют 2-й очаговой зоне. Колебания от первой и второй очаговых зон по своей интенсивности и количественным характеристикам сопоставимы, поэтому можно будет их объединить. Объединив потоки событий с повторяемостью 220 и 200 лет, получим поток с периодом повторяемости 100 лет.

Оценку характеристик колебаний грунтов будем проводить, используя данные второй очаговой зоны, но при этом увеличим частоту повторяемости ожидаемых событий.

Оценку максимального ускорения скального грунта при сильном землетрясении возможном на данной территории можно получить на основе сравнительного анализа записей афтершоковых землетрясений, зарегистрированных в г. Махачкале. Для анализа нами были использованы сейсмограммы и велосиграммы землетрясений зарегистрированные на скальных грунтах при довольно большом интервале интенсивности повторных толчков (от 3 до 7 баллов). Измерения перемещений, скоростей, преобладающих периодов и продолжительности интенсивной фазы землетрясений велись по схеме приведённой в работе [2]. Для каждой исследуемой сейсмограммы был получен набор видимых в S-волне преобладающих периодов и соответствующих им максимальных амплитуд. Измерялась также эффективная продолжительность колебаний, т.е. промежуток времени за которой амплитуда записи снижается до $1/3$ от максимальной. Полученные в результате визуальной обработки значения максимальных амплитуд и соответствующих им преобладающих периодов на записях смещений и скоростей были пересчитаны в ускорения. Для оценки достоверности полученных результатов были определены скорости по смещениям с последующим сравнением с прямой записью скорости в той же точке (численное дифференцирование). Результаты сравнения по 40 землетрясениям показали, что стандартное отклонение $Ig \ddot{X}_{выч}$ при дифференцировании равно 50 %. Ошибки визуальных операций кажутся значительными, но стандартная ошибка перехода для всего массива данных (40 точек) в 10 раз меньше и составляет по логарифму величину 0,027, что соответствует относительной ошибке 5%. С использованием ускорений полученных для землетрясений различной интенсивности было определено максимальное ускорение колебания грунта при землетрясении с $M=7$ путём интерполяции. В итоге получено, что максимальное ускорение колебания грунта, соответствующее расчётной повторяемости 100 лет, равно 230 см/с^2 .

Для рассматриваемой территории переход от амплитуд ускорений скальных грунтов к рыхлым и определение соответствующих им преобладающих периодов колебаний грунтов производился по методике изложенной в работе [3]. Полученные результаты приведены в таблице 1.

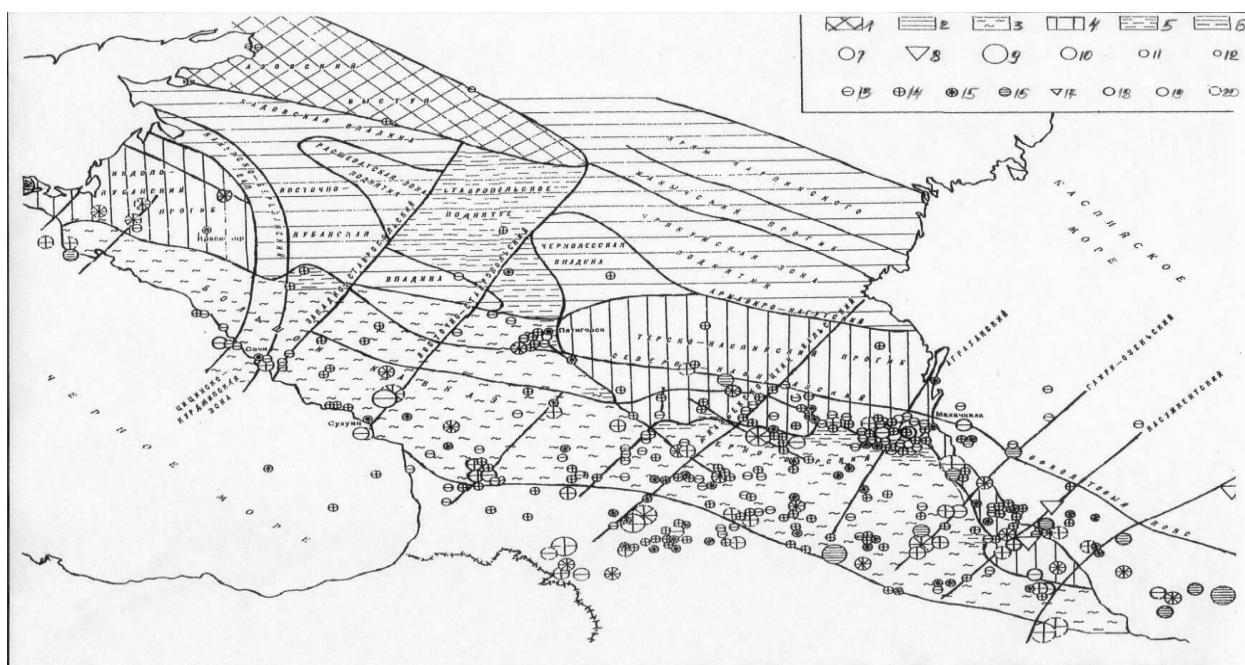


Рис.1. Карта эпицентров землетрясений Северного Кавказа

1.-области докембрийской складчатости; 2.-области палеозойской складчатости; 3.-области альпийской складчатости; 4.-предкавказские краевые прогибы; 5.-поперечные структуры; 6.-глубинные разломы; 7.-землетрясения неглубокие; 8.-глубокие; 9.- $M=6,1-7,0$; 10.- $M=5,1-6,0$; 11.- $M=4,1-5,0$; 12.- $M \leq 4$; 13.-глубина очага $h=0-10$; 14.- $h=11-20$; 15.- $h=21-40$; 16.- $h=41-80$; 17.- $h=81-150$ км, 18-класс точности –1956-1974; 19-до 1956 г.; 20-по макросейсмическим данным

Таблица 1

Максимальные ускорения колебания грунтов соответствующие расчётной повторяемости 100 лет

Категория грунта по СНИП-11-7-81*	Максимальные ускорения грунта, cm/s^2	Диапазон преобладающих периодов T_j в сек
I	230	0.25÷0.6
II	300	0.10÷0.7
III	360	0.10÷0.8

Получив значения максимальных ускорений для трех категорий грунтов соответствующих периоду повторяемости событий 100 лет, перейдем к повторяемостям 500, 1000 и 5000 лет. Для учёта повторяемости используем данные о стандартах отклонения максимальных ускорений $\sigma(\lg a_{\max})$. По различным данным стандарт отклонения находится в диапазоне 0.2÷0.3. По данным В. Джойнера и Д. Бура [4] - 0.28, К. Краузе [4] - 0.24, К. Сади́х [4] - 0.15, К. Кавашима [5] - 0.197÷0.224. Для акселерограмм Италии [5] - 0.173.

Средняя оценка стандарта отклонения приблизительно равна 0.2. Чтобы рассчитать максимальные ускорения при рассматриваемых повторяемостях найдём величину коэффициента k , используя формулы, полученные в работе [6],

$$\lg k = \lg(a_0/a_{100}) = \sigma(\lg a_{\max}) \cdot \Phi^{-1} \cdot (1-100\backslash T), \quad (1)$$

$$a_0 = a_{100} \cdot k, \quad (2)$$

где T - расчётный период повторяемости, Φ^{-1} – обратная функция нормального закона,

a_0 – рассчитываемое максимальное ускорение соответствующее определённой повторяемости.

При $T=500$ получаем $k=1.46$, при $T=1000$ - $k=1.8$, а при $T=5000$ - $k=2.56$.

Подставляя данные коэффициенты в формулу (2), получим максимальные ускорения, соответствующие принятым повторяемостям. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Максимальные ускорения колебания грунтов возможные на территории г. Махачкалы

T, период повторяемости событий (лет)	Максимальные ускорения колебания грунта, см/с ²		
	Категория грунта по СНИП-11-7-81*		
	I	II	III
100	230	300	360
500	340	440	520
1000	420	540	650
5000	590	770	920

Для расчёта сейсмостойкости зданий и сооружений необходимо перейти от максимальных ускорений к расчётным. Формула перехода от максимальных ускорений к расчётным получена в виде:

$$a_{расч} = \sigma_a \cdot [-2 \cdot \ln \{ \pi \cdot Q / \omega_j \cdot \beta_j \cdot T \cdot \tau \}]^{1/2}, \quad (3)$$

где σ_a – среднеквадратическое значение ускорения колебания грунтов, $\sigma_a = \gamma \cdot a_{max}$ (средняя оценка коэффициента $\gamma=0.3$), Q -вероятность превышения ускорением заданного уровня за рассматриваемый период времени, ω_j – эффективная частота процесса приблизительно равная преобладающей частоте колебания грунтов, τ - продолжительность интенсивной фазы землетрясения (10÷20 сек), β_j – интенсивность повторяемости землетрясений класса j , T - рассматриваемый период времени.

По формуле (3) определяем $a_{расч}$ – расчётное значение ускорения колебания грунтов соответствующее определённому периоду повторяемости событий, расчётному периоду времени и заданной вероятности превышения. Далее используя вышеприведённые значения максимальных ускорений грунтов и выражение (3), в соответствии новым комплектам карт ОСР-97 находим расчётные ускорения колебаний грунтов. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчётные ускорения колебания грунтов характерные для г. Махачкалы

T, период повторяемости событий (лет)	Расчётные ускорения колебания грунта, см/с ²			Балльность
	Категория грунта по СНИП-11-7-81*			
	I	II	III	

500	320	420	490	8
1000	400	510	620	9
5000	560	730	870	10

Значения расчётных ускорений для средних грунтовых условий г.Махачкалы несколько отличаются от принятых в картах общего сейсмического районирования ОСР-97, но они являются оправданными и соответствующими местным сейсмологическим условиям. Таким образом, для г. Махачкалы в качестве расчётных ускорений колебаний грунтов можно рекомендовать значения ускорений приведённые в таблице 3 и балльности по СНИП-11-7-81* (актуализированная редакция).

Для особо ответственных сооружений, зданий высотой более 16 этажей и зданий с системами активной сейсмозащиты нормы проектирования предусматривают проведение динамических расчетов на сейсмическое воздействие с использованием инструментальных записей ускорений основания при землетрясении или синтезированных акселерограмм. Махачкала не имеет инструментальных записей сильных землетрясений, поэтому возникает необходимость разработать синтезированные акселерограммы. Записи сейсмических колебаний грунтов показывают, что в большинстве случаев они носят нестационарный случайный характер. Поэтому в данной работе синтезированные акселерограммы генерированы в виде нестационарных случайных процессов. Для этого сейсмические колебания грунтов представим в виде:

$$\ddot{Y}_{гр}(t) = \sigma f(t) \varphi(\omega_j t), \quad (4)$$

где σ - среднеквадратическое значение ускорения колебаний грунтов; $f(t)$ - функция, характеризующая огибающую случайного процесса; $\varphi(t)$ - стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией равной единице.

Огибающая $f(t)$ принимаем в виде[7]:

$$f(t) = \varepsilon t e^{-\varepsilon t}, \quad (5)$$

где параметр $\varepsilon = 0,05 \omega_j$, а ω_j является преобладающей частотой сейсмических колебаний грунтов на рассматриваемой территории.

В качестве корреляционной функции стационарного процесса $\varphi(t)$ принимаем функцию

$$K(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_j \tau, \quad (6)$$

где α являет параметром, характеризующим ширину спектра воздействия.

Для функции (6) наиболее рациональным является линейный оператор в виде рекуррентного уравнения

$$\xi[n] = \sum a_k \cdot x(n-k) - \sum b_k \cdot \xi[n-k].$$

Здесь $\xi[n]$ – случайные числа, коррелированные по заданному закону;

a_k, b_k – параметры оператора.

Алгоритм определения параметров оператора приведен в [8]. Он предусматривает нахождение спектральной плотности $F(z)$ по корреляционной функции $R(n)$, факторизацию спектральной плотности для получения передаточной функции $k(z)$ и преобразование передаточной функции с целью получения параметров a_k, b_k .

Используемый оператор и его параметры имеют вид:

$$\xi[n] = a_0 \cdot x[n] + a_1 \cdot x[n-1] + b_1 \cdot \xi[n-1] + b_2 \cdot \xi[n-2],$$

$$a_0 = \sigma \cdot \sqrt{(\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4 \cdot \alpha_0^2})}; \quad a_1 = \sigma \cdot \alpha_0 / a;$$

$$b_1=2 \cdot \rho^4 \cdot \cos\gamma_0; \quad b_2=-\rho^2; \quad \alpha_0=\rho \cdot (\rho^4-1) \cdot \cos\gamma_0;$$

$$\alpha=1-\rho^4; \quad \rho=e^{-\gamma_0}; \quad \gamma_0=\omega_0 \cdot \Delta t.$$

Генерирование искусственных акселерограмм с заданными характеристиками производилось на ЭВМ. Для получения равномерно-распределенных чисел в интервале от 0 до 1 использовался генератор случайных чисел RANDU. Преобразование равномерно-распределенных чисел в последовательность с заданным математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением производилось по подпрограмме GAUSS. Для определения математического ожидания последовательности стационарных случайных чисел использовалось выражение $m_\phi = \sum x_i/n$, где x_i -случайное число, а n -общее количество случайных чисел.

В отдельных реализациях отклонение математического ожидания от 0 достигало до 6-7 %. Для устранения этого проводилось центрирование процесса. Алгоритм центровки: $x'_i = x_i - (m - m_\phi)$, где x_i – не откорректированное значение случайной величины, а m_ϕ – получаемое математическое ожидание.

Нормировка акселерограммы проводилась в виде $NOR = x(j) / x_{max}$,

где $x(j)$ – прогнозируемое максимальное ускорение генерируемой акселерограммы, а x_{max} – максимальная амплитуда акселерограммы.

Согласно выражениям (4-6), синтезируемая акселерограмма зависит от преобладающей частоты ω_j , среднеквадратического значения ускорения σ , и от параметров α и ε . Параметр σ характеризует интенсивность сейсмических колебаний грунтов и связан с максимальным ускорением соотношением [8]: $\sigma = a_{max} / \{2 \cdot \ln(\omega_j \cdot \tau / \pi)\}^{1/2}$. Так как данные о ширине спектра для исследуемой территории недостаточны для установления региональной зависимости $\alpha = f(\omega_j)$, были проанализированы данные о характере влияния α на максимальное значение спектра реакции и на ширину спектра на уровне 0.5 от максимума. Отношение α/ω_j меняется в довольно широких пределах от 0.15 до 0.72. В данной работе принято среднее по мировым данным значение равное 0.5 от преобладающей частоты ω_j . Параметр ε , определяющий форму огибающей генерируемого воздействия, принят согласно данным работы [7] равным $0.05 \cdot \omega_j$.

При генерировании и расчете на случайное воздействие возникает необходимость в определении требуемого числа реализаций случайного процесса. В работе [9] установлено, что для оценки усреднённых спектров реакции достаточно ограничиться 20-25 реализациями. Так как в данной работе рассматриваются методы генерирования случайных процессов с применением цифрового моделирования, т.е. связанных с получением дискретных реализаций, возникает задача определения шага дискретизации синтезированных акселерограмм Δt . На данный момент нет чётких зависимостей выбора значения Δt . Известно только то, что ошибка вычисления дискретных значений сигнала на выходе непрерывной системы будет мала, если шаг дискретизации процессов удовлетворяет условиям теоремы Котельникова [10]. Однако эта теорема не определяет величину ошибки при заданном шаге Δt , когда функции сигнала и системы не имеют строго ограниченного спектра. В связи с этим ставилась задача определения оптимального шага Δt при условии его удовлетворения теореме Котельникова и дополнительных требований, определяемых применением синтетических акселерограмм для расчёта сооружений. Результаты исследований [11] показали, что величина Δt не может быть более четверти видимого периода, т.к. с увеличением шага дискретизации возникает несоответствие между информацией, получаемой в аналоговом и дискретном видах. Таким образом, существует некая зависимость между преобладающим периодом и шагом дискретизации. Величина видимого периода может быть принята равной величине преобладающего периода сейсмического воздействия. Тогда необходимое условие выбора шага имеет вид $\Delta t \leq 0.25 \cdot T_j$. Исходя из этого условия, принималась величина максимально

допустимого шага Δt , и моделировались синтетические акселерограммы с преобладающими периодами в интервале, от 0,1 до 0,8 сек при входном воздействии с максимальным ускорением 400 см/с^2 . В таблице 4 приведены усреднённые значения максимальных ординат синтезированных акселерограмм по 20 реализациям в зависимости от шага дискретизации и преобладающего периода.

Таблица 4

Зависимость шага дискретизации при генерировании искусственных акселерограмм от преобладающего периода

Преобладающие периоды колебаний T_j сек	Максимальная ордината синтетической акселерограммы в зависимости от шага дискретизации Δt					
	$0,25 \cdot T_j$	$0,20 \cdot T_j$	$0,10 \cdot T_j$	$0,08 \cdot T_j$	$0,05 \cdot T_j$	$0,01 \cdot T_j$
0,1	315,17	377,04	629,25	566,41	757,39	5393,94
0,2	342,09	292,36	446,87	452,52	919,22	6658,21
0,3	374,29	295,42	407,75	808,85	735,24	5164,24
0,4	382,57	282,37	478,77	524,09	842,12	6110,34
0,5	375,39	348,81	484,38	781,20	699,84	4761,27
0,6	333,72	307,80	447,67	542,02	738,60	7294,94
0,7	353,13	357,77	623,27	517,17	945,77	5933,09
0,8	362,06	357,95	549,51	647,47	847,47	4754,35

Из анализа этих результатов можно сделать вывод, что с уменьшением шага дискретизации увеличиваются ординаты синтезированных акселерограмм и наоборот. Совершенно ясно, что уровень максимальной ординаты синтезированной акселерограммы должен совпадать с уровнем входного значения максимального ускорения. Если исходить из этого принципа, то наиболее соответствующим ему является линейная зависимость $\Delta t = 0,1 \cdot T_j$. Используя приведённые в таб. 3 расчётные значения ускорений для трёх категорий грунтов г. Махачкала и соответствующие им преобладающие периоды сейсмических колебаний, нами получен набор синтезированных акселерограмм, который может быть использован для динамических расчетов ответственных зданий и сооружений в г. Махачкале. Некоторые из полученных синтезированных акселерограмм показаны на рисунках 2 и 3.

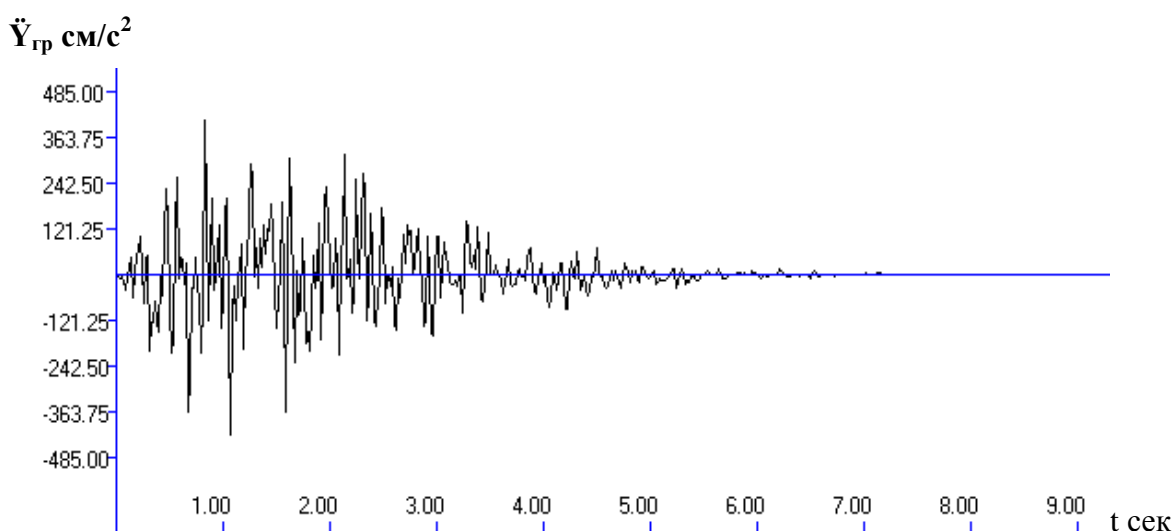


Рис. 2. Синтезированная акселерограмма при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{расч.} = 420 \text{ см/с}^2$, $T_j = 0.1 \text{ с.}$, $\Delta t = 0.01 \text{ с.}$, $\xi = 0.05$, $t = 10 \text{ сек.}$

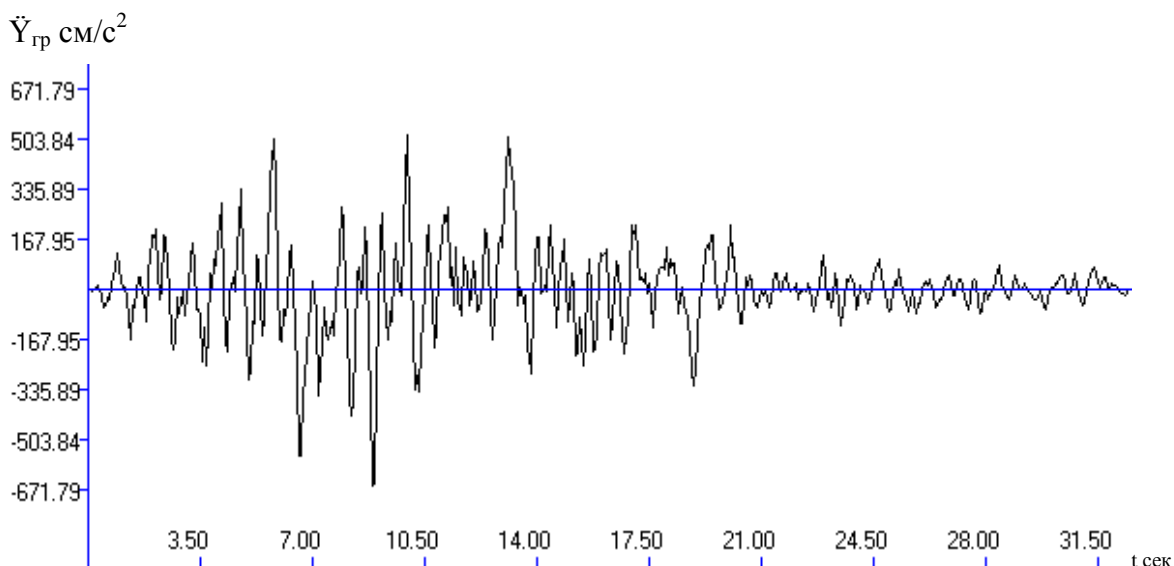


Рис. 3. Синтезированная акселерограмма при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{расч.}=420 \text{ см/с}^2$, $T_j=0.6\text{с.}$, $\Delta t=0.06\text{с.}$, $\xi=0.05$, $t=35 \text{ сек}$

Полученные результаты позволили построить для г. Махачкалы графики коэффициентов динамичности. Для этого вначале были построены огибающие спектров реакции упругого осциллятора с затуханием 0,05 при сейсмических воздействиях, смоделированных по вышеприведённой методике с использованием параметров соответствующих изучаемому району. Затем в виде отношения максимального абсолютного ускорения осциллятора к расчётному ускорению колебания грунтов были построены кривые коэффициентов динамичности, для I, II, III категорий грунтов. Из-за того, что для г. Махачкалы прогнозируются только высокочастотные сейсмические воздействия, эти кривые оказались примерно одинаковыми. На рис. 4 показана усреднённая кривая коэффициентов динамичности для г. Махачкалы.

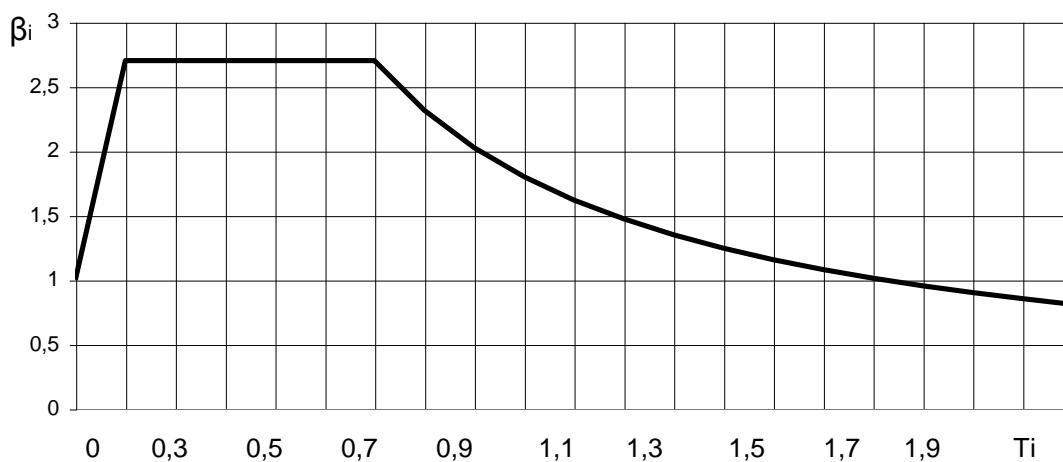


Рис. 4. График коэффициента динамичности для г. Махачкалы

Значения коэффициента динамичности находим по выражениям:

при $T_i \leq 0,1$ $\beta_i = 1 + 17 \cdot T_i$,

при $0,1 < T_i < 0,6$ $\beta_i = 2,7$,

при $T_i \geq 0,6$ $\beta_i = 1,62/T_i$.

Расчёты конструкций проведённые с применением данного графика позволяют получить более надёжные результаты без значимого увеличения начальных затрат на антисейсмическое усиление зданий.

Библиографический список

1. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. с.307.
2. Нерсесеров И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Ризниченко Ю.В. Инструкция по динамическим измерениям на сейсмограммах. // Вопросы инженерной сейсмологии, выпуск 5. М.: Наука, 1961. - 147-167 с.
2. Новый каталог сильных землетрясений СССР. М.: Наука, 1977 г.
- П.И. Крамынин, В.В. Штейнберг. Параметры колебаний плотных грунтов. // Вопросы инженерной сейсмологии, выпуск 18. М.: Наука, 1976. - 23-35 с.
3. Jouner W.B., Boor D.M. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion // Proc. Earth. End. Soil Dyn. Div. Asce. 1988. Vol. 11 GT. P. 43-102.
- Sabetta F., Pugliese A. Attenuation of peak horizontal acceleration and Velocity from Italian strong-motion records // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1987. Vol. 77. P. 1491-1513.
- Kawashima K., Airawa K., Takahashi K. Attenuation of peak ground motion and absolute acceleration response spectra // Proc. VI I I World conf. On earthquake eng. San Francisco, 1984. Vol. 2. P. 254-284.
- Гусев А.А. Предварительный вариант расчётных сейсмических нагрузок для Петропавловска-Камчатского // Вопросы инженерной сейсмологии, выпуск 31. М.: Наука, 1990. - 67-85 с.
- Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. - М.: Стройиздат, 1976. - 232 с.
- Вибрации в технике: Справочник. Т. 1. // Колебания линейных систем. Под. ред. В.В. Болотина. - М.: Машиностроение. 1978. - 352 с.
- Синящек М.Н. К статистической теории сейсмических спектров // Строительная механика и расчет сооружений. - 1982, №2, 62-65 с.
- Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М: Сов. Радио, 1971. - 328 с.