

С. А. ПИРУЗЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СООРУЖЕНИЯ ПО ЗАПИСЯМ СИЛЬНЫХ И СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МИКРОСЕЙСМО- РАЙОНИРОВАНИЯ*

Сейсмическое микрорайонирование осуществляется с целью дифференцированного учета сейсмического воздействия на сооружения в зависимости от грунтовых и гидрогеологических условий участка строительства. Поскольку на практике возводятся широкого класса гражданские и инженерные сооружения с различными динамическими характеристиками, то для сейсмического микрорайонирования наиболее точными будут инструментальные наблюдения, доставляющие спектральную информацию о поведении (реакции) различного типа сооружений при землетрясениях, т. е. характеризующие интенсивность землетрясения с инженерной точки зрения.

Такой мерой интенсивности землетрясения, удобной для практического применения и имеющей простой физической смысл, является спектр приведенных сейсмических ускорений $\tau_{\max}(T, \alpha)$, где T —период свободных колебаний линейных осцилляторов, α —мера их затухания [6].

Под приведенным сейсмическим ускорением понимается такое постоянное неизменное ускорение, под воздействием которого линейный осциллятор при заданном демпфировании отклоняется на ту же максимальную величину, что и при данном землетрясении. Отсюда ясно, что если вес груза линейного осциллятора (или вес сосредоточенного груза сооружения с одной степенью свободы, моделируемого осциллятором в пределах упругих колебаний) равен Q , то полная сейсмическая сила инерции есть

$$S = \frac{\tau_{\max}(T, \alpha)}{g} Q \text{ или } S = m \cdot \tau_{\max}(T, \alpha), \quad (1)$$

где g —ускорение силы тяжести, m —масса сосредоточенно груза. Спектр $\tau(T, \alpha)$ связан с динамическим коэффициентом $\beta(T)$ (СНиП II 12—62) соотношением [2, 6, 9]

$$\tau(T, \alpha, t)|_{\max} = K_c \beta(T)g, \quad (2)$$

* Переработанный текст доклада, прочитанного на Всесоюзном семинаре по сейсмическому микрорайонированию, проведенном Советом по сейсмологии АН СССР в апреле 1966 г. в Москве.

где K_c — так называемый сейсмический коэффициент, значение которого зависит от величины сейсмической балльности, принятой для данного пункта строительства.

Из соотношений (1) и (2) видно, что спектр $\tau(T)$ является интегральной мерой сейсмического воздействия на сооружение, автоматически учитывающей как интенсивность сотрясения почвы при землетрясении (коэффициент K_c), так и динамические характеристики сооружения (коэффициент $\beta(T)$). Отсюда исходит важность получения спектров $\tau(T)$ по данным регистрации реальных землетрясений как для целей сейсмического микрорайонирования, так и для усовершенствования методов расчета сейсмостойких конструкций в целом.

Метод микросейсморайонирования на основе спектров $\tau(T)$ регламентирован «Инструкцией по проведению микросейсморайонирования» [5]. Краткое описание метода имеется в работах [9, 12].

Сопоставление интенсивностей землетрясений для различных пунктов осуществляется следующим образом. По показаниям приборов, зарегистрировавших землетрясение, определяются спектры $\tau(T)$. Если обозначить через $\tau_0(T)$ спектр, отнесенный к эталонным грунтам, к которым привязана балльность карты общего сейсмического районирования, то приращение интенсивности землетрясения для данного локального условия, характеризуемого спектром $\tau(T)$, определяется множителем [9]

$$B(T) = \frac{\tau(T)}{\tau_0(T)} \quad (3)$$

или, если выразить приращения в долях балла,

$$K(T) = \frac{\lg \tau(T) / \tau_0(T)}{\lg 2} \quad (4)$$

В случае отсутствия достаточной статистики об относительных значениях интенсивностей землетрясения, определяемых формулой (4), допускается более грубая оценка.

Спектры $\tau(T)$ в общем носят гиперболический характер, т. е. приближенно могут быть выражены зависимостью

$$\tau(T) = \frac{A}{T} \quad (5)$$

где величина постоянной A представляет собою осредненную меру интенсивности землетрясения и определяется формулой [9, 10, 14]

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i T_i}{n} \quad (6)$$

При введении средней меры интенсивности, поправочный коэффициент приращению B (или K), определяемый формулой (4), упрощается и превращается в постоянное число для всего спектра

$$B = \frac{A}{A_0} \quad \text{или} \quad K = \frac{\lg A / A_0}{\lg 2} \quad (7)$$

где A — средняя мера интенсивности для сравниваемого грунта

A_0 — средняя мера интенсивности, отнесенная к опорным грунтовым условиям.

Описанный метод исследования позволяет оценить расчетное значение $\beta_1(T)$ динамического коэффициента с учетом локальных условий, изучаемого участка, по сравнению со стандартным значением $\beta(T)$, принятым в «Нормах» и относимым к исходным (средним) грунтовым условиям той или иной зоны карты сейсморайонирования страны, а также установить предпочтительный диапазон периодов свободных колебаний

$$\beta_1(T) = B(T)\beta(T) \quad (8)$$

сооружений, подлежащих проектированию и возведению в данных грунтовых условиях местности.

До настоящего времени были известны два способа получения спектров $\tau_{\max}(T, \alpha)$ по данным регистрации сильных землетрясений:

- а) непосредственно с помощью многомаятниковых сейсмометров типа АИС;
- б) с помощью акселерограмм сильных землетрясений на основе их интегрирования.

Первый способ получает все более широкое применение для решения задач микросейсморайонирования и инженерной сейсмологии [7, 9, 10, 12]. По показаниям сейсмометров для всех пунктов наблюдений при данном землетрясении строится график $\tau_{\max}(T)$; по оси абсцисс откладывается период свободных колебаний, а по оси ординат — величины $\tau_{\max}$. На рис. 1, 2, 3 в качестве примера приведены графики $\tau_{\max}(T)$ для трех землетрясений, записанных сейсмометрами АИС-2 в различных грунтовых условиях в городах Ереване, Душанбе, Ташкенте. Анализ данных графика $\tau_{\max}(T)$ ереванского землетрясения 1957 г (рис. 1) по формулам (6) и (7) показывает, что коэффициент приращения $B(K)$ на скальных грунтах (№ 6, базальты) и на галечнике с маломощным суглинистым плащом (№ 9) по отношению к эталонным грунтовым условиям — современным пролювиальным отложениям городской котловины (№ 11) соответственно равен 0,55 (—0,86 балла) и 0,70 (—0,51 балла). Аналогичные или близкие к ним результаты получаются и по душанбинским и ташкентским землетрясениям.

Второй способ, впервые практически осуществленный с помощью электронно-вычислительных машин на основе американских акселерограмм в АИСМе [13], получил относительно малое распространение из-за отсутствия в сейсмических районах сети станций, оснащенных акселерографами. Принципиально возможно использование сейсмограмм с записью смещения почвы во времени при землетрясениях для построения спектров приведенных сейсмических ускорений или так называемых спектров действия [3, 4], отличающихся от первых постоянным множителем $\frac{4\pi^2}{T^2}$ [6, 9]. Однако этот способ до последнего времени широко не использовался в связи с отсутствием простой и достаточно точной методики обработки сейсмограмм.

Автором разработана методика определения спектра приведенных сейсмических ускорений на основе реальных сейсмограмм с использованием современной вычислительной техники. Методика заключается

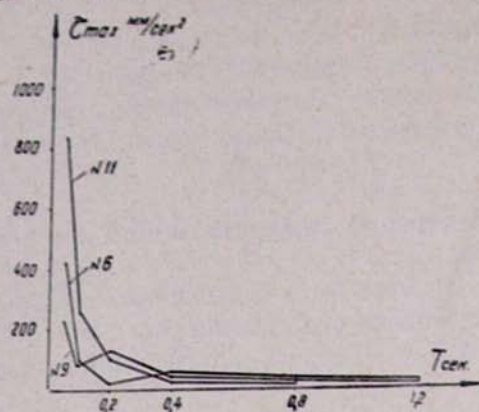


Рис. 1. Спектр τ (1) Ереванского землетрясения 14 февраля 1957 г. Интенсивность $J=4$ балла, эпицентрального расстояние $\Delta=18$ км

Сейсмометры: № 11—на современных пролювиальных отложениях; № 6—на базальтах; № 9—на галечниках

в решении уравнения колебания упругой системы с одной степенью свободы при заданном законе колебания перемещения почвы при землетрясении, минуя процесс двукратного дифференцирования сейсмограммы.

Приведенное сейсмическое ускорение находим по формуле

$$\tau(T, z, t)|_{\max} = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y(t, z)|_{\max}, \quad (10)$$

где $y(t, z)$ представляет из себя решение дифференциального уравнения движения системы с одной степенью свободы, которое при нулевых начальных условиях имеет вид [1]:

$$y = -\frac{T}{2\pi} \int_0^t e^{-\frac{\pi\tau}{T}(t-z)} y_0'(z) \sin \frac{2\pi}{T}(t-z) dz. \quad (11)$$

Чтобы избежать двукратного дифференцирования сейсмограмм, представляющих величины $y_0'(t)$, проинтегрируем по частям дважды (11). Тогда будем иметь:

$$y = -y_0(t) + \frac{2\pi}{T} \int_0^t y_0(z) \varphi(z) e^{-\frac{\pi\tau}{T}(t-z)} dz,$$

$$\text{где } \varphi(z) = \left[\left(1 - \frac{z^2}{4} \right) \sin \frac{2\pi}{T}(t-z) + z \cos \frac{2\pi}{T}(t-z) \right] \quad (12)$$

при начальных условиях $y_0 = y_0' = 0$ и $y = y' = 0$ при $t = 0$.

Здесь в правой части уравнения фигурирует уже $y_0(t)$, определяемое условием задачи, при наличии сейсмограмм, и, стало быть, с помощью электронно-вычислительной машины с большей точностью можно получить значение $y(t)$ при заданных значениях T и α .

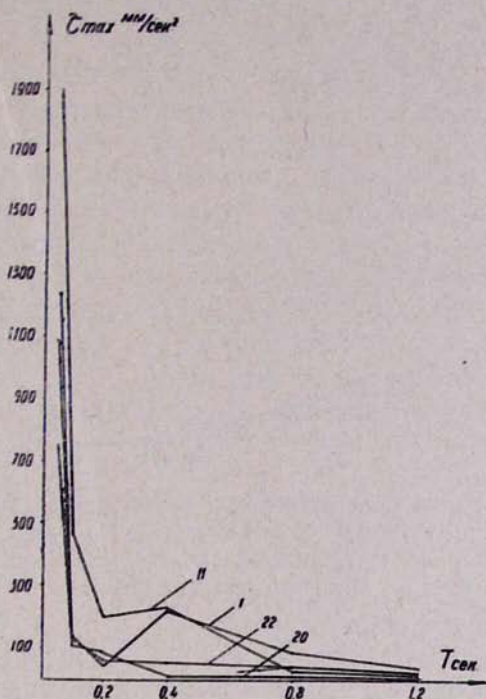


Рис. 2. Спектр $\tau(T)$ Душанбинского землетрясения 23 августа 1961 г. $J=6$ баллов, $\Delta=15$ км
Сейсмометры: № 11—на лессовидных суглинках мощностью 20 м; № 1—на водонасыщенных галечниках; № 22—на сухих галечниках; № 20—на скальных породах

Далее, по формуле (10), помножив значения $y(t)$ на постоянный множитель, получим значения $\tau(t)$ для ряда комбинаций T и α , представляющих практический интерес. Затем, выбирая максимальные значения $\tau(t)$, можно построить спектральную кривую $\tau_{\max}(T)$ при фиксированном значении α .

Таким образом, создана возможность использования сейсмограмм для определения инженерной меры интенсивности землетрясения—спектра $\tau(T, \alpha, t)$. Описанный прием дает достаточно точные результаты для относительно длиннопериодных колебаний почвы. При очень короткопериодных сейсмических колебаниях, обычно искажаемых сейсмографами, погрешность вычислений может возрастать.

По этому методу в настоящее время на ЭВМ „Раздан-2“ подсчитываются значения $\tau(T, \alpha, t)$ для нескольких землетрясений, зарегистрированных в различных грунтовых условиях в 1962—1963 гг. временными сейсмическими станциями инженерно-сейсмологической

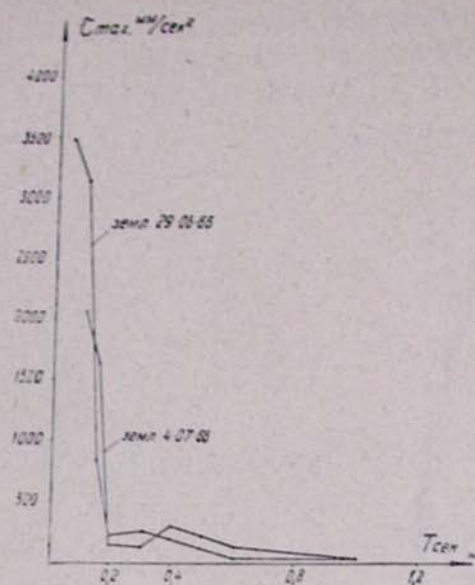


Рис. 3. Спектр $\tau(T)$ Ташкентских землетрясений 29 июня и 4 июля 1966 г. $J=7$ баллов, $\Delta=7,7$ км. Сейсмометр № 4—установлен на галечниках с высоким уровнем грунтовых вод

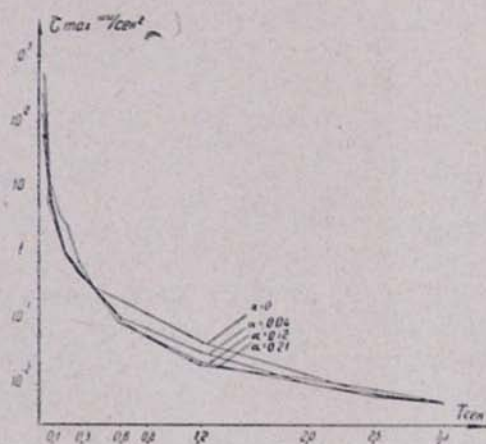


Рис. 4. Спектр $\tau(T)$, полученный от сейсмограммы землетрясения в Турции 9 февраля 1963 года, зарегистрированного на временной инженерно-сейсмологической станции № 6 „Каназ“ в г. Ереване. Магнитуда $M=4$; $\Delta=250$ км

сети г. Еревана [12]. На рис. 4 представлен образец спектра $\tau_{max}(T)$ построенного по результатам этих вычислений на основе сейсмограммы землетрясения 9/II 1963 г., происшедшего в Турции, с магнитудой 1-4 и зарегистрированного в г. Ереване на расстоянии 250 км, на временной станции „Каназ“.

Анализ спектров приведенных сейсмических ускорений, полученных по предлагаемому способу, даст возможность, помимо прочего, корректировать величину динамического коэффициента β (T) в зависимости от грунтовых условий, а также оценить на количественной основе влияние внутреннего трения сооружения на величину сейсмической нагрузки, способствуя тем самым усовершенствованию методов расчета сооружений на сейсмостойкость.

В частности, предварительный анализ полученных материалов показывает, что изменение коэффициента внутреннего трения сооружений α в широком диапазоне от 0 до 0,21 ($\beta = 0 \div 0,66$) приводит к изменению $\tau_{\max}$ также в широких пределах в зависимости от периодов свободных колебаний сооружений. Например, для спектра $\tau_{\max}(T, \alpha)$ турецкого землетрясения, зарегистрированного в г. Ереване на белоземистых суглинках (рис. 4) при вышеуказанных крайних значениях α , величина $\tau_{\max}$ уменьшается от 4 раз (для $T = 0,03$ сек) до 2,2 раза (для $T = 1,2$ сек). Для более гибких сооружений ($T = 2,5 - 3,0$ сек) такой общей закономерности не наблюдается.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики
и инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Карапетян Б. К., Пирузян С. А. Изучение сейсмодвижений колебаний в тоннеле Армводстроя на Лусаванском карьере. Тр. АИСМ, вып. 1, 1959.
2. Карапетян Б. К. Многомаятниковые сейсмометры и результаты их применения в инженерной сейсмологии. Ереван, изд. «Айпетрат», 1963.
3. Медведев С. В. Зависимость сейсмических воздействий от периодов собственных колебаний сооружений. Тр. ГЕОФИАН, М., № 36, 1956.
4. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., 1962.
5. Медведева С. В., Бунэ В. И., Гзелишвили И. А., Карапетян Б. К., Кац А. З., Лямзина Г. А., Пирузян С. А., Попов В. В., Самков Б. И., Шагинян С. А. Инструкции по проведению сейсмического микрорайонирования. М., Тр. ИФЗ АН СССР, № 22 ((189), 1962.
6. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Ереван, изд. 2-е, 1959.
7. Назаров А. Г., Карапетян Б. К., Пирузян С. А., Сафарян А. Н., Шагинян С. А. Предварительные итоги работ инженерно-сейсмологического отряда ТКСЭ в районе г. Душанбе. Изв. Отд. техн. наук АН Тадж. ССР, 3 (30), 1959.
8. Назаров А. Г. Об изменениях «Норм и правил строительства в сейсмических районах (СН-8—57)». Материалы по изменениям СН-8—57. Ереван, изд. АИСМ, 1960.
9. Назаров А. Г., Карапетян Б. К., Пирузян С. А. Сейсмическое микрорайонирование на инструментальной основе. ДАН Арм. ССР, т. 22, № 3, 1961.
10. Нечаев В. В. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Душанбе на основе инструментально-геологического метода. Материалы Душанбинского совещания по инженерной сейсмологии и сейсмостойкому строительству. Тр. ТИСС, т. 93, Душанбе, 1959.

11. Пиружян С. А. Фиксация землетрясения 14 февраля 1957 г. в г. Ереване многоточечными сейсмометрами АИС-2. Изв. АН Арм. ССР, сер. техн., т. 11, № 5, 1958.
12. Пиружян С. А. О сейсмическом микрорайонировании на основе инструментальных наблюдений. Изв. АН Арм. ССР, сер. техн. наук, т. 15, № 4, 1962.
13. Хачиян Э. Б. Использование вычислительных машин для определения сейсмической нагрузки по акселерограммам сильных землетрясений. Бюлл. Совета по сейсмологии, № 14, М., 1963.
14. Шагинян С. А. Приведенные сейсмические ускорения при землетрясениях. Бюлл. Совета по сейсмологии, № 14, М., 1963.