

Б. И. ВОЛОСЕЦКИЙ, А. В. КЕНДЗЕРА,
О. Н. САФРОНОВ, С. Т. ВЕРБИЦКИЙ

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ АКСЕЛЕРОГРАММ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЙ КРУПНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

При строительстве атомных, тепловых и гидроэлектростанций в районах с ощутимой сейсмичностью необходим прогноз динамических деформаций, вызванных движениями оснований и фундаментов этих объектов. Он производится с учетом максимально возможных сейсмических движений, которые задаются с помощью расчетных акселерограмм.

Для проектирования важных инженерных сооружений на территории юго-западных областей Украины и Молдавии возникает необходимость учитывать, наряду со слабой местной сейсмичностью, воздействия сильных землетрясений из зоны Вранча. Эта очаговая зона находится в изгибе дуги Восточных Карпат на территории Румынии и представляет собой довольно ограниченную область. Наиболее обоснованная в настоящее время геодинамическая модель этой сейсмогенной зоны предложена в [8].

Для расчета динамических деформаций необходимо иметь данные об исходных сейсмических колебаниях оснований фундаментов инженерных сооружений. Для этой цели лучше всего подошли бы реальные акселерограммы максимально возможных для очаговой зоны землетрясений. В них содержалась бы объективная информация об особенностях очаговой зоны, о воздействии среды на путях распространения сейсмических волн от очагов к строительной площадке и о возможных эффектах резонансного усиления сейсмических колебаний в осадочной толще под самой площадкой. Учитывая резонансные свойства строящихся инженерных сооружений, можно было бы получить ожидаемые значения динамических деформаций.

Однако получить реальные записи подкоровых карпатских землетрясений за время, отведенное для изысканий под проектирование, практически невозможно, так как средняя частота их повторения оценивается [10] как $\lg N = 3,69 - 0,76M$ для

$3,5 \leq M \leq 7,4$, где M — магнитуда землетрясения. Следовательно, землетрясения с $M \sim 7$ в этой зоне могут происходить не чаще чем два-три раза в сто лет. Поэтому для построения расчетных акселерограмм приходится использовать расчетные методы.

Наиболее обоснованны в настоящее время методы, с помощью которых расчетные акселерограммы генерируются как случайные процессы в рамках, ограничиваемых закономерно-

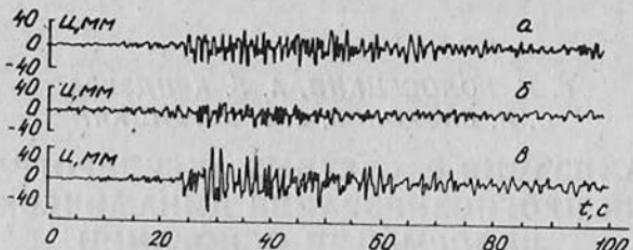


Рис. 1. Запись землетрясения 4 марта 1977 г. на ИСС-2 в г. Кишиневе:

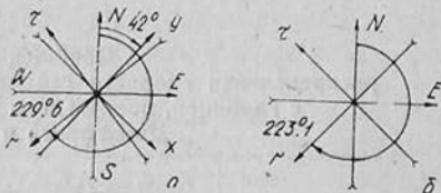
а, б, в — компоненты x , y и z соответственно.

стями, описывающими излучение и распространение волн от очаговой зоны к свободной поверхности площадки. Однако воспользоваться такими методами для построения расчетных акселерограмм от землетрясений Вранча нельзя, так как обычно применяемые закономерности непригодны для подкоровых карпатских землетрясений, а для построения региональных закономерностей не хватает материалов наблюдений. Наиболее эффективно в этих условиях применение способа, в котором расчетные акселерограммы получают путем пересчета из записей максимальных событий, зарегистрированных вне строительной площадки. Действительно, очаги сильных подкоровых карпатских землетрясений сосредоточены в сравнительно небольшой по объему очаговой зоне и имеют в основном подобные механизмы [2, 10]. Следовательно, можно ожидать, что воздействия этих землетрясений на определенный объект в пределах рассматриваемого региона не будут значительно отличаться. На инженерно-сейсмометрических станциях Института геофизики и геологии АН МССР в городах Кишиневе и Кагуле получены записи сильных румынских землетрясений 1977 и 1986 гг., значения которых близки к максимальным для зоны Вранча. На месте регистрации наблюдались семи-, восьмибалльные сотрясения, следовательно, эти записи могут послужить основой для построения акселерограмм, имитирующих сотрясения такой же и меньшей интенсивности.

Теоретические аспекты способа получения расчетных акселерограмм путем пересчета из записей сейсмических колебаний от реальных землетрясений описаны авторами в [3]. В настоящей статье представлены результаты его применения для построения расчетных акселерограмм, имитирующих пяти-, се-

многобалльные сотрясения от сильных румынских землетрясений на строительной площадке, расположенной в Черкасской области. Исходным материалом для получения расчетных акселерограмм послужила запись сильнейшего из зарегистрированных румынского землетрясения 4 марта 1977 г. [1]. Общий вид записи представлен на рис. 1. На рис. 2 показаны направления и знаки смещений и ускорений в составляющих исходной записи и расчетной акселерограммы.

Рис. 2. Схема направлений и знаков в компонентах смещений и ускорений в составляющих исходной записи и акселерограммы.



Вектор колебаний на сейсмической станции обычно задают тремя составляющими: вертикальной z и двумя горизонтальными NS , EW , соответствующими направлениям «север—юг» и «восток—запад». Для станций инженерно-сейсмометрической сети горизонтальные составляющие x и y обычно совпадают со взаимно перпендикулярными главными осями зданий. При получении расчетных акселерограмм более удобно использовать систему координат, связанную с очагом землетрясения. Поэтому кроме указанных выше используем также горизонтальную радиальную r и перпендикулярную к ней горизонтальную тангенциальную t составляющие.

Спектры акселерограмм, пересчитанные из записей, представляем в виде [3]

$$a(\omega) = \frac{-\omega^2 Y(\omega) \Psi_2 R_2 \theta_2(\omega, \Delta) H_2(\omega)}{S(\omega) \Psi_1 R_1 \theta_1(\omega, \Delta) H_1(\omega)}, \quad (1)$$

где ω — угловая частота; $Y(\omega)$ — спектр исходной записи, Ψ — коэффициент, зависящий от диаграммы направленности из очага на станцию; R — коэффициент, описывающий геометрическое расхождение лучевой трубки; $\theta(\omega, \Delta)$ — частотная характеристика, описывающая затухание и дисперсию колебаний в транзитной среде за счет неидеальной упругости; Δ — эпицентрическое расстояние; $H(\omega)$ — частотная характеристика верхней рыхлой части разреза земной коры, приближаемой в рассматриваемом случае горизонтально-слоистыми моделями вертикально-неоднородного полупространства с поглощением; $S(\omega)$ — частотная характеристика регистрирующего прибора. Индексами 1 и 2 обозначены величины, характеризующие пути распространения сейсмических волн к станции и к строительной площадке соответственно.

Предполагая, что Ψ и R не зависят от частоты, для конкретного сочетания очага, станции и площадки величина $(\Psi_2 R_2 / \Psi_1 R_1)$ будет представлять некоторый постоянный множитель β [3].

При получении частотных характеристик $\theta(\omega, \Delta)$, описывающих затухание и дисперсию сейсмических волн в неидеальной упругой среде на пути от очаговой зоны к станции или площадке, используется распределение скорости сейсмических волн по глубине в виде модели строения Земли по Джейффрису [6], соответствующей годографу Джейффриса-Буллена [12]. Для описания распределения добротности Q с глубиной взята модель SL8 из работы [9]. Добротность в указанной модели определяется

Таблица 1

Обобщенная модель
распределения скорости сейсмических волн и добротности
с глубиной, построенная на основании моделей
Джейффриса и Андерсена

Глубина H , км	Скорость сейсмических волн, км/с		Добротность среды для периодов 300 с	
	v_p	v_s	Q_p	Q_s
0,0	5,60	3,20	1242,22	500,00
33,0	7,50	4,35	759,39	360,88
96,0	7,94	4,44	212,97	90,00
160,0	8,13	4,54	270,99	105,00
223,0	8,33	4,64	281,51	105,00
287,0	8,54	4,74	280,55	105,00
350,0	8,75	4,85	283,33	106,18
413,0	8,97	4,96	334,00	127,75
477,0	9,50	5,23	411,13	160,50
540,0	9,91	5,46	435,07	168,02
603,0	10,26	5,67	521,28	208,01
667,0	10,55	5,85	539,90	216,44
794,0	10,99	6,00	663,11	274,20
920,0	11,29	6,30	697,62	289,62
1074,0	11,50	6,40	833,14	345,78

лена путем обобщения большого числа данных по длиннопериодным объемным, поверхностным волнам и собственным колебаниям Земли. Значения приведены к периоду колебаний 300 с.

На основании указанных моделей путем интерполяции построена обобщенная модель распределения скорости и добротности среды с глубиной. Ее значения даны в табл. 1. Учитывая, что практический интерес вызывают решения в инженерном диапазоне частот, частота f^* , соответствующая максимальным скоростям v_p и v_s , принималась равной 10 Гц.

Для каждой конкретной модели строения верхней части разреза земной коры под станцией или строительной площадкой обобщенная модель строения Земли в верхней своей части заменялась соответствующей моделью осадочного чехла. Для описания зависимости между добротностью $Q(\omega)$, коэффициентом поглощения $a(\omega)$, фазовой скоростью $v(\omega)$ и частотой ω применялись соотношения феноменологической модели В. Фу-

терман [11]. Частотные характеристики $H(\omega)$ для модели верхней рыхлой части разреза земной коры под станцией и площадкой рассчитывались матричным методом [5].

Модель строения осадочного чехла в районе расположения инженерно-сейсмометрической станции ИСС-2 в г. Кишиневе построена по данным бурения разведочных скважин. Недостающие параметры восполнялись по справочной литературе. Для перехода от декрементов поглощения ν к добротности вещества Q на той же частоте использовались соотношения, приведенные в [4]. Параметры модели строения среды под регистрирующей станцией приведены в табл. 2.

Модели строения среды под строительной площадкой получены по данным сейсморазведки. Недостающие параметры взяты из справочной литературы. Акселерограммы рассчитаны для ряда вероятных моделей. В настоящей работе приведены результаты расчетов только для модели, представленной в табл. 3.

Существующие алгоритмы расчета частотных характеристик моделей среды позволяют определить их только для случая падения волн одного определенного типа. В то же время на интересующих нас эпицентральных расстояниях разделение записи на отдельные типы волн осуществить трудно. Поэтому вместе решения задачи, когда по трехкомпонентной записи определяется трехкомпонентная акселерограмма колебаний на площадке, рассчитываем набор из пяти компонент акселерограммы, которые с избытком описывают все возможные эффекты резонансного усиления сейсмических колебаний на строительной площадке.

При переходе от спектра расчетной акселерограммы (1) к ее временному виду учитываем математическую неустойчивость этой операции, связанную с наличием погрешностей в исходных данных. Для регуляризации решений используем методику А. Н. Тихонова [7]. Расчетные акселерограммы имеют вид

$$a(t) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} F(\omega, q) a(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

где Re обозначает выделение действительной части обратного преобразования Фурье; $F(\omega, q)$ — стабилизирующая функция [4]. Параметр регуляризации q определяется путем минимизации функционала, описывающего разность между теоретической и реальной сейсмограммами.

Для сведения к минимуму влияния отличий в механизмах, энергиях и глубинах очагов, эпицентральных расстояниях и других макроусловиях акселерограммы сначала рассчитываем в нормированном виде, что позволяет избавиться от влияния коэффициента β , а для получения расчетных значений нормированные акселерограммы умножаем на максимальные пиковые значения ускорений $A(I)$, соответствующие расчетной интен-

сивности сотрясений. Региональная зависимость между максимальными ускорениями движений почвы и макросейсмической интенсивностью, установленная в [10] по акселерограммам, зарегистрированным во время румынского землетрясения 4 марта 1977 г. следующая: $A(7) \approx 2A(6) \approx 4A(5) \approx 1 \text{ м/с}^2$.

Необходимо отметить, что $A(7)$ совпадает с соответствующим значением из СНИП 11—7—81.

Таблица 2
Модель строения осадочного чехла
под сейсмической станцией ИСС-2 в г. Кишиневе

Номер слоя	Состав	Толщина слоя H , км	Скорость сейсмических волн, км/с		Плотность вещества, г/см ³	Добротность среды для периодов 0,01 с	
			v_p	v_s		Q_p	Q_s
1	Суглинки, супеси, пески, гравий	0,026	0,85	0,50	1,90	16,00	7,38
2	Известняки, глины, мергели, трепел	0,271	2,75	1,50	2,20	16,00	6,34
3	Доломиты, известняки	0,481	3,75	2,50	2,50	30,00	17,76
4	Аргиллиты, алевролиты, песчаники	0,360	4,10	3,00	2,70	300,00	214,00
5	Граниты		4,49	3,50	2,90	400,00	208,00

Таблица 3
Модель строения осадочного чехла
под строительной площадкой

Номер слоя	Состав	Толщина слоя H , км	Скорость сейсмических волн, км/с		Плотность вещества, г/см ³	Добротность среды для периодов 0,01 с	
			v_p	v_s		Q_p	Q_s
1	Песок намывной	0,002	0,29	0,19	1,70	7,27	6,85
2	Песок водонасыщенный	0,005	1,40	0,20	1,80	15,97	7,52
3	Супесь аллювиальная водонасыщенная	0,007	1,60	0,28	1,98	15,97	7,52
4	Суглинок аллювиальный водонасыщенный	0,005	1,80	0,32	1,98	15,97	7,52
5	Песок мелкий аллювиальный водонасыщенный	0,006	1,55	0,35	2,00	15,97	7,52
6	Песок средней крупности водонасыщенный	0,011	1,65	0,36	2,02	15,97	7,69
7	Песок гравелистый палеогеновый	0,002	1,70	0,40	1,98	24,24	8,08
8	Каолин	0,010	2,10	0,90	2,00	29,45	24,24
9	Гранито-гнейсы		5,50	3,20	2,90	317,32	160,24

Расчеты акселерограмм велись в инженерном диапазоне частот 0,1...10,0 Гц. Для построения составляющих расчетной акселерограммы, имитирующих падение на подошву осадочной толщи под площадкой продольных волн, используем начальную часть вертикальной составляющей записи длительностью 23,6 с. Кажущаяся скорость распространения продольной волны от эпицентра к станции равна 8 км/с, а к площадке — 8,33 км/с. Глубина проникновения луча продольной волны при

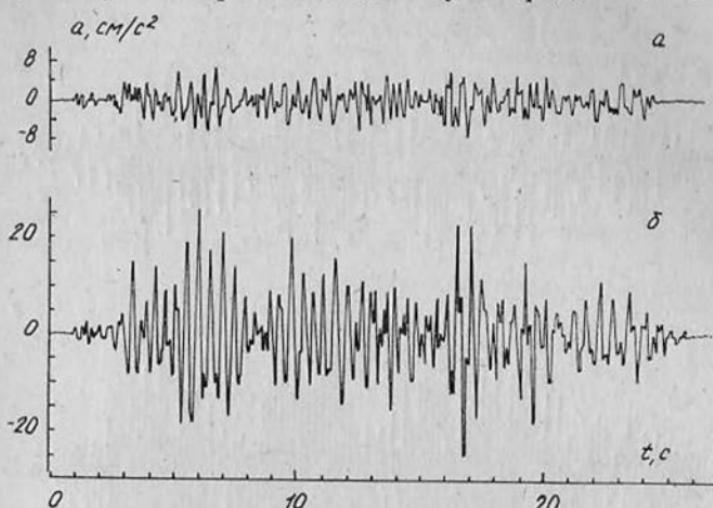


Рис. 3. Вертикальная (а) и горизонтальная радиальная (б) составляющие расчетной акселерограммы, имитирующие шестибалльные сотрясения, вызываемые продольными волнами.

ее распространении от очага к станции и площадке составляет соответственно 116 и 223 км. Для построения составляющих расчетных акселерограмм, имитирующих падение SV и SH волн, используем x и y составляющие записи длительностью 35,7 с, начиная с момента вступления S -волн, согласно [12]. Кажущаяся скорость распространения поперечных волн от эпицентра к станции равна 4,7 км/с, а к площадке — 5,5 км/с. Глубина проникновения луча поперечной волны при ее распространении от очага к станции и площадке соответственно 130 и 250 км.

В результате реализована расчетная акселерограмма, имитирующая сотрясения, которые могут вызвать подкоровые землетрясения из очаговой зоны Вранча на строительной площадке. На рис. 3 и 4 изображены ее составляющие, рассчитанные для шестибалльных сотрясений.

Рассмотренный в [3] и проиллюстрированный в настоящей статье способ является детерминистическим. Однако он не противоречит и легко сопрягается со статистическими подходами к получению наборов расчетных акселерограмм. Действительно, в проведенных расчетах используют ряд параметров, значения

которых известны приближенно. Это такие параметры, как скорость распространения сейсмических волн, добротность среды, распределение параметров с глубиной, значение коэффициента β . Учитывая их, можно проводить расчет акселерограмм для комбинаций средних и граничных значений всех параметров. По полученным наборам ненормированных акселерограмм можно изучать статистические закономерности, которым подчиняются огибающие их спектров, а также самих движений во врем-

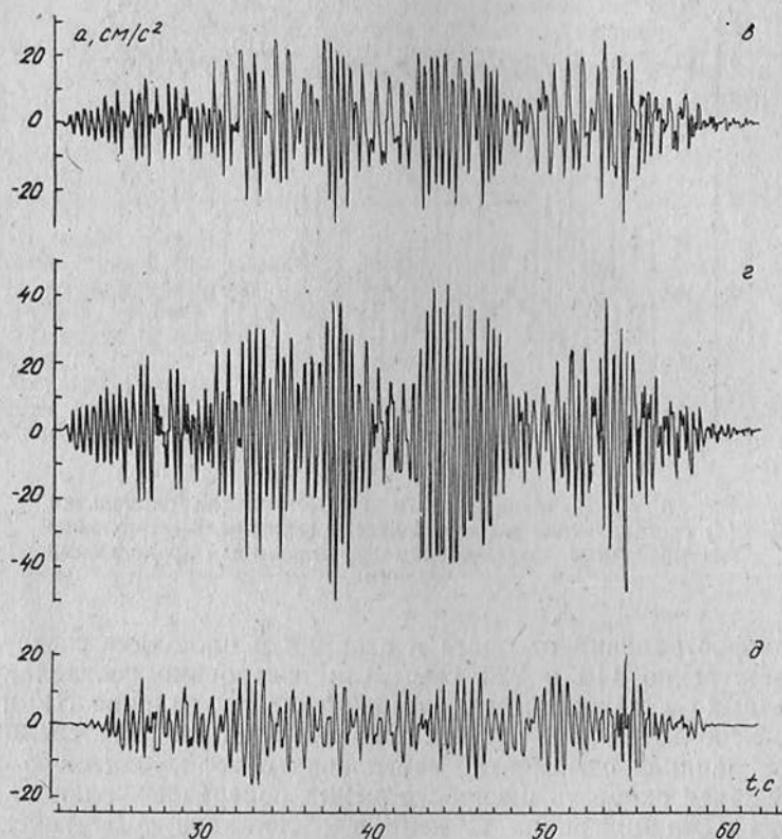


Рис. 4. Вертикальная (δ), горизонтальная радиальная (ε) и горизонтальная тангенциальная (ζ) составляющие расчетной акселерограммы, имитирующие шестибалльные сотрясения, вызываемые SV и SH волнами.

менной области. Полученные закономерности можно в дальнейшем использовать для генерирования наборов расчетных акселерограмм путем двойной модуляции: сначала спектров случайных колебаний, а потом и формы синтезированных движений.

1. Алказ В. Г., Анчаров Р. Ф., Гинсарь В. Н., Роман А. А. Результаты спектрального анализа записей землетрясения 4. 03. 1977 г., полученных из ИСС городов Кишинева и Кагула // Карпатское землетрясение 4 марта

1977 г. и его последствия. М., 1980. С. 217—223. 2. Введенская А. В., Голубева Н. В., Рупрехтова Л. Особенности напряженного состояния изгиба Карпатской дуги и параметры механизма развития очага землетрясения 4. 03. 1977 г. // Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия. М., 1980. С. 106—133. 3. Волосецкий Б. И., Кендзера А. В., Коненкина М. Н. Определение исходных сейсмических воздействий для расчетов динамических деформаций крупных энергетических объектов // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1987. Вып. 46. С. 6—12. 4. Лоссовский Е. К. К вопросу о дисперсии фазовой скорости объемных сейсмических волн в поглощающей среде // Геофиз. журн. 1981. Т. 3. № 3. С. 33—39. 5. Ратникова Л. И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М., 1973. 6. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. М., 1969. 7. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., 1979. 8. Чекунов А. В. Сейсмоактивный район Вранча — тектонічний аспект. // Доп. АН УРСР. Сер. «В». 1986. № 5. С. 21—26. 9. Anderson D. L., Hart R. S. Q of the Earth // J. Geophys. 1987. V. 83, à 12. P. 5869—5882. 10. Constantinescu L., Enescu D. Cufremurele din Vrancea in cadru stiintific si tehnologic // Edit. Acad. Repub. Soc. Rom. Bucuresti. 1985. 11. Futterman W. I. Dispersive body waves // J. Geophys. 1962. V. 67, № 13. P. 5279—5291. 12. Jeffreys H., Bullen K. E. Seismological Tables // Brit. Assoc. Adv. Sci. 1940. V. 48. P. 468.