Известия НАН РА, Науки о Земле, 1995, XLVIII, № 1, с. 38—45

В. Г. ГРИГОРЯН

ИНЖЕНЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА ПРИ СИЛЬНЫХ АФТЕРШОКАХ СПИТАКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

С целью выявления распределения динамических параметров и их сравнительного анализа были изучены наиболее сильные афтершоки Спитакского землетрясения с энергиями $K=11\div13$, зарегистрированные акселерографами, работающими в ждущем режиме за последние несколько месяцев после основного толчка. Были установлены качественные и количественные зависимости между инженерными параметрами и основными очаговыми характеристиками. Сопоставление показало наличие некоторых региональных особенностей в распределении динамических параметров. Средние спектры реакции сильных афтершоков находятся в хорошем согласии с расчетными спектрами, вычисленными при аналогичных очаговых параметрах.

Определение региональных сейсмических воздействий является важнейшей составной задачей инженерной сейсмологии. Одним из районов, где имеется возможность впрямую, на основе экспериментальных данных, определить наиболее вероятные параметры воздействий для землетрясений средней силы, и далее путем сопоставления и сравнительного анализа с аналогичными параметрами для регионов со сходными геолого-тектоническими условиями оценить ожидаемые параметры воздействия для более сильных толчков, является эпицентральная зона Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. Сравнительно большой объем фактического материала в виде акселерограмм афтершоков этого землетрясения получен при полевых работах за период декабрь 1988 г.—март 1989 г. в зоне с линейной протяженностью примерно 50 *км*. Она занимала обширную территорию и захватывала крупные населенные пункты, в том числе города Гюмри (Ленинакан), Спитак, Степанаван, Ванадзор (Кировакан). Акселерографы, работающие в ждущем режиме и регистрирующие сильные движения грунта, были установлены непосредственно на грунте. Расстановка приборов и обслуживание осуществлялись ЭСЭ ИФЗ АН СССР.

На сейсмических станциях «Ленинакан» и «Степанаван» аппаратура размещалась на специальных бетонных постаментах. Грунты в местах установки акселерографов относятся ко II категории по сейсмическим свойствам. Общее количество пунктов регистрации—7.

Использовались акселерографы АСЗ—2 и ССРЗ—14 с чувствительностью соответственно 60 и 20 *мм/g*, работающие в ждущем режиме с прямой оптической регистрацией на кинопленку шириной 70 *мм*. Наиболее сильные сейсмические события с энергиями в диапазоне $11<K<13$ регистрировались одновременно в нескольких пунктах. По определениям координат афтершоков [7] устанавливались средние удаления приборов от эпицентров. Сводные данные об основных параметрах сильных движений приведены в табл. 1.

На основе полученных записей сильных движений грунта (из записей ускорений всех трех компонентов выбирались наиболее сильные и, как правило, большинство из них горизонтальные) представилась возможность определить инженерные параметры колебаний и провести их сравнительный анализ.

1. Максимальные ускорения грунта

В общем случае распределение максимальных значений ускорений грунта (без строгой дифференциации категории грунтов под регистрирующие приборы) достаточно закономерное.

Таблица 1

Параметры сильных афтершоков Спитакского землетрясения

№№ п/п	Дата	Время	Координаты φ	Координаты λ	Класс энергии, K*	Магнитуда, M**	Глубина, h, *км*	Число станций
1	31.12.80	04.07	40,90	44,10	12	4,44	10	6
2	04.01.89	07.29	40,79	44,34	12	4,44	5	6
3	08.01.89	16.53	40,88	44,27	11,8	3,72	10	4
4	30.03.89	16.36	40,97	43,97	12,3	4,66	10	2

* Имеются разные определения значений *K* в разных источниках.
** Магнитуда определена согласно формуле $K = 1{,}8\,M + 4$.

Так, в случае землетрясений 31.12.88г. и 04.01.89г., энергия которых составляла 12, при среднем удалении от эпицентра 16,3 *км* всех шести пунктов регистрации среднее значение ускорения A_{max} составило 62,8 *см/с*². Если из данной выборки исключить аномальное значение ускорения, зарегистрированное в пункте «Торос» (154,4 *см/с*²), то среднее для K=12 окажется еще меньшей (37 *см/с*² при стандарте отклонения $\sigma=20$ *см/с*²) *и* почти приравнивается к среднестатистическому для данных классов энергии. Следует отметить, что чрезмерно большое значение ускорения грунта в пункте «Торос» было зафиксировано и при толчке 30.03.89г. (K=12,3), обусловленное, на наш взгляд, местными условиями. При толчке 04.01.89г. распределение ускорений достаточно ровное и закономерное. Сравнительно большое значение ускорения было зафиксировано в пункте «Джрашен»—77,8 *см/с*². Однако эта станция находилась ближе остальных к эпицентру—около 10 *км* при среднем удалении всех пунктов 20,7 *км*. Среднее значение ускорения для этого толчка, имеющего примерно такой же класс энергии по всем станциям, составило 32,0 *см/с*². При остальных двух толчках (08.01.89г. и 30.03.89г.), кроме вышеназванного большого значения A_{max} в пункте «Торос», большое значение ускорения зафиксировано и в «Налбанде»—около 0,2 g во время землетрясения 08.01.89г. с энергией K=11,8. Без этих значений ускорений среднее A_{max} для землетрясения 08.01.89г. составляет 63,9 *см/с*², а для землетрясения 30.03.89г.—26,5 *см/с*², по остальным пунктам регистрации.

Среднее A_{max} для всех четырех событий, энергия которых колеблется в пределах $K=11\div13$ ($M=4{,}2\div4{,}6$) по всем регистрирующим станциям, составляет 46,3 *см/с*² при стандарте отклонения 14, т. е. находится в пределах среднестатистических значений ускорений. Распределение ускорений близнормальное и хорошо сопоставляется с графиком распределения ускорений для землетрясений интенсивностью 6 баллов (нормативный диапазон ускорений для $J=6$ баллов составляет $30\div60$ *см/с*²). При этом, по данным [6], среднее A_{max} для землетрясений интенсивностью 6 баллов составляет 42 *см/с*² при стандарте отклонений ±14. В табл. 2 приведены значения максимальных ускорений грунта и преобладающие периоды для сильных афтершоков Спитакского землетрясения.

Таблица 2

Значения максимальных ускорений и преобладающих периодов сильных афтершоков Спитакского землетрясения

Пункт регистрации	Удаление от эпицентра, Δ, *км*	Максимальное ускорение грунта, A_{max} *см/с²*	Преобладающий период, T, *с*	Компонента	Среднее значение A_{max} *см/с²*
Землетрясение 31.12.88г. (К=12,0)					
Налбанд	6,8	111,5	0,16	В—З	
Торос	19,7	154,4	0,18	В—З	62,8
Ленинакан	24,9	31,2	9,20	В—З	
Джрашен	13,5	39,0	0,16	В—З	
Мец-Парни	6,0	23,4	0,25	С—Ю	
Степанаван	27,5	19,5	0,22	В—З	
Землетрясение 04.01.89г. (К=12,0)					
Налбанд	14,3	35,1	0,16	С—Ю	
Торос	39,8	23,4	0,15	С—Ю	32,0
Джрашен	9,7	71,8	0,25	В—З	
Мец-Парни	17,0	27,3	0,14	С—Ю	
Кировакан	16,0	9,36	—	С—Ю	
Степанаван	25,7	24,96	0,11	В—З	
Землетрясение 08.01.89г. (К=11,8)					
Налбанд	11,5	197,8	0,2	В—З	
Джрашен	14,0	92,8	0,17	С—Ю	106,5
Мец-Парни	16,0	35,1	0,12	В—З	
Степанаван	16,0	—	—	С—Ю	
Землетрясение 30.03.89г. (К=12,3)					
Торос	12,4	249,6	0,12	В—З	
Ленинакан	25,6	26,5	0,08	С—Ю	135,5

Рассмотрим теперь зависимость A_{max} от энергии источника, по возможности, для большого диапазона изменения К (или магнитуды М). С этой целью область варьирования значений ускорений экстраполирована до значения $A_{max}=0{,}2g$, полученного при основном толчке (запись в пос. Гукасян, К=16,5). Зависимость $A_{max}=f(M)$, по имеющимся данным, тогда можно аппроксимировать следующим выражением:

$$lg A_{max}=0.23\,M+0{,}67 \qquad (1)$$

очевидно, при некотором дефиците в «промежутке», т. е. в интервале энергетических величин К=13÷16. В случае утверждения и придания достаточно надежного статистического веса данной аппроксимации можно будет рекомендовать региональные оценки ускорений при ожидаемых сильных землетрясениях.

Сопоставление результатов, полученных на основе данных местных землетрясений, со среднестатистическими позволяет с большей уверенностью говорить об объективности полученных оценок (особенно они надежны, когда сопоставляются регионы с близкими геолого-тектоническими условиями).

Сводные графики такого сопоставления представлены на рис. 1, где приведены кривые зависимости $A'_{max}=f(M)$, полученные: 1) на основании анализа инструментальных данных сильных афтершоков Спитакского землетрясения; 2) на независимом материале по амери-

канским землетрясениям с $M=4{,}2\div7{,}7$ и 3) путем обобщения результатов исследований, приведенных в литературе [4, 5, 8, 9, 10 и др.]. При этом все три графика относятся к близочаговой зоне с $\Delta\leqslant25$ *км*. По приведенному сопоставлению можно сделать следующее важное

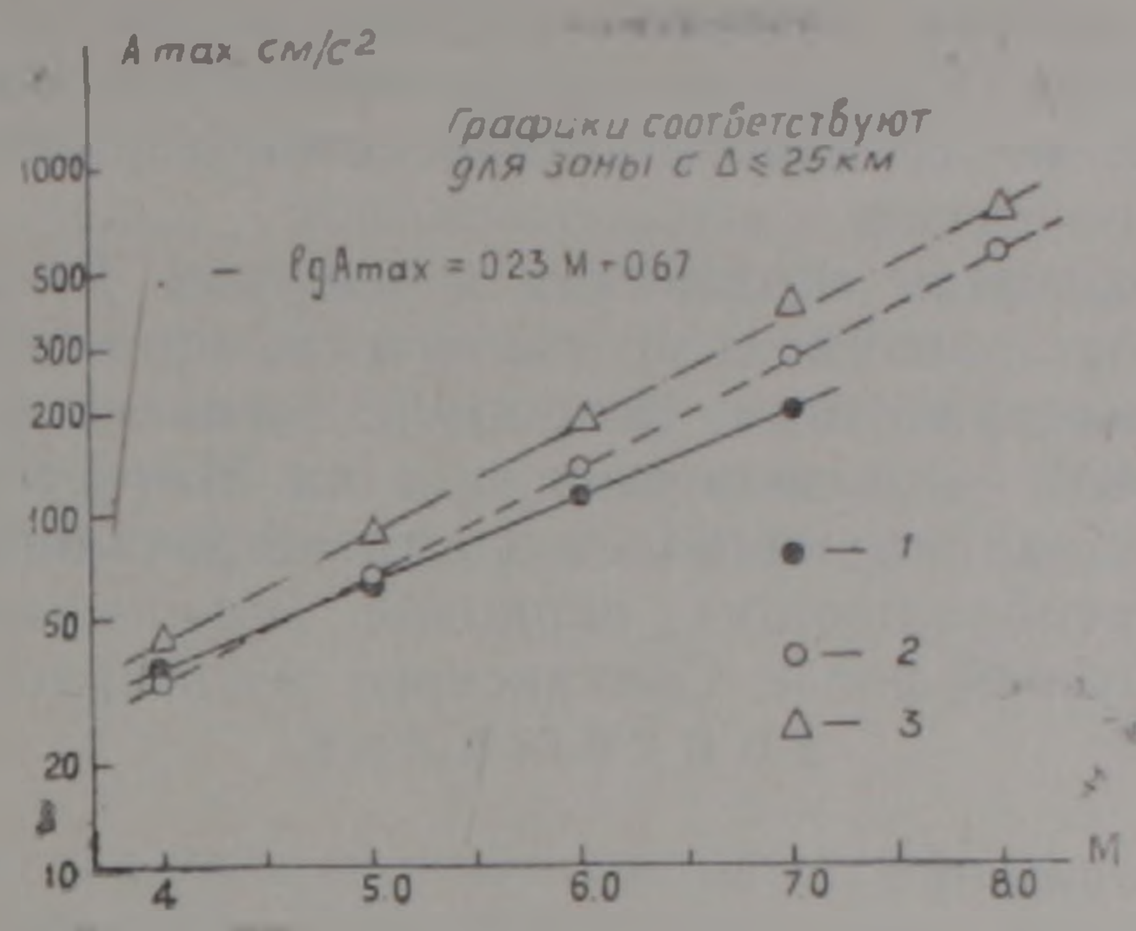

Рис 1. Сопоставление графиков зависимости максимальных ускорений грунта от магнитуды землетрясения.

заключение (пока очень осторожное)—рост ускорений с увеличением значений магнитуд для нашего региона происходит несколько медленней по сравнению с другими двумя случаями. Но это утверждение необходимо в дальнейшем более обоснованно доказать на сравнительно представительном материале.

Выявить четкие зависимости $A_{max}=\Phi(\Delta)$ оказалось сложнее ввиду неустойчивого характера такой зависимости вообще. Следуя общей закономерности этой зависимости, можно провести некую огибающую точек распределения ускорений от эпицентрального расстояния, которая будет характеризовать данную зависимость скорее качественно. Это экспоненциально спадающая кривая—от близких расстояний до больших Δ. При этом сравнительный анализ показывает ,что спад значений ускорений с увеличением расстояний в случае региональной кривой происходит несколько быстрее. Большую роль в этом может оказать среда, через которую проходит сейсмическое возмущение. Это второе очень важное, и опять таки пока предварительное заключение.

2. Преобладающие периоды максимальных ускорений

Значения преобладающих периодов максимальных ускорений— T_y измерялись непосредственно на записях, соответствующих максимальным амплитудам. Общий диапазон вариации значений T_y от 0,08 до 0,4 *с* (см. табл. 2). Наиболее часто встречаются значения $0{,}15\div0{,}2$ *с*, что характерно для данных энергий.

Распределение преобладающих периодов максимальных амплитуд ускорений нормальное и довольно четко выражается «пик» значений. Такое четко выраженное распределение преобладающих периодов, особенно в условиях далеко не строгой дифференциации грунтовых условий в местах регистрации колебаний, говорит о характере местных землетрясений, и в частности, генерации в преобладающем большинстве высокочастотных колебаний. Этот факт должен быть

учтен при рекомендации расчетных (стандартных) спектров воздействий или же региональных кривых $\beta(T)$ с учетом также полученной в [3] зависимости $T_y = f(M)$ для широкого диапазона магнитуд на основании сравнительного анализа данных большого числа сильных и слабых местных землетрясений.

Полученные оценки преобладающих периодов ускорений при сильных афтершоках Спитакского землетрясения находятся в хорошем соответствии со среднестатистическими данными по литературным данным.

Достаточно хорошая сходимость в оценках T_y получается и при независимом сопоставлении с результатами, приведенными в [1] по американским землетрясениям. Например, согласно [1], следуя выражению $\lg T_a = 0{,}18M - 1{,}6$ значению энергии $M = 4{,}4$ ($K = 12$) соответствует $T_a = 0{,}16$ *с*, а оно наиболее часто встречающееся значение в распределении преобладающих периодов максимальных ускорений для сильных движений после Спитакского землетрясения с энергиями $K = 11 \div 13$.

3. Спектры реакции

Спектры реакции с затуханиями 0,1; 0,16; 0,223 для наиболее сильных компонентов акселерограмм определялись для 16-и значений периодов свободных колебаний—T от 0,05 *с* по 3,0 *с*. Всего было рассчитано 48 спектров $\tau(T, \alpha)$ от всех четырех афтершоков, записанных в 7-и пунктах. Графики построены только для значения $\alpha = 0{,}16$. Общий разброс значений приведенных ускорений на спектрах достаточно велик. Однако, если опять из выборки исключить две записи, полученные в «Торосе», где фиксированы аномально большие ускорения грунта (во время толчков 31.12.88г. и 30.03.89г.), и одну—в пункте «Налбанд» (при 08.01.89г.), то в остальных случаях имеется достаточно стабильное огибающее всех спектров $\tau(T\alpha)$. При рассмотрении же спектров для землетрясений одинаковых энергий, что имело место в случаях 31.12.88г. и 04.01.89г., разброс в значениях приведенных ускорений еще более уменьшится. Далее для сравнительной оценки сопоставлялись: 1—средний спектр $\tau(T\alpha)$ для 6-балльных землетрясений по результатам исследований [6]; 2—средний (расчетный) спектр реакции, построенный при идентичных очаговых параметрах ($M = 4{,}4$; $\Delta \leq 15$ *км*) согласно рекурентной формуле $\tau(T, \alpha) = \tau_{II}(T, \alpha) \cdot 10^{II \cdot M}$

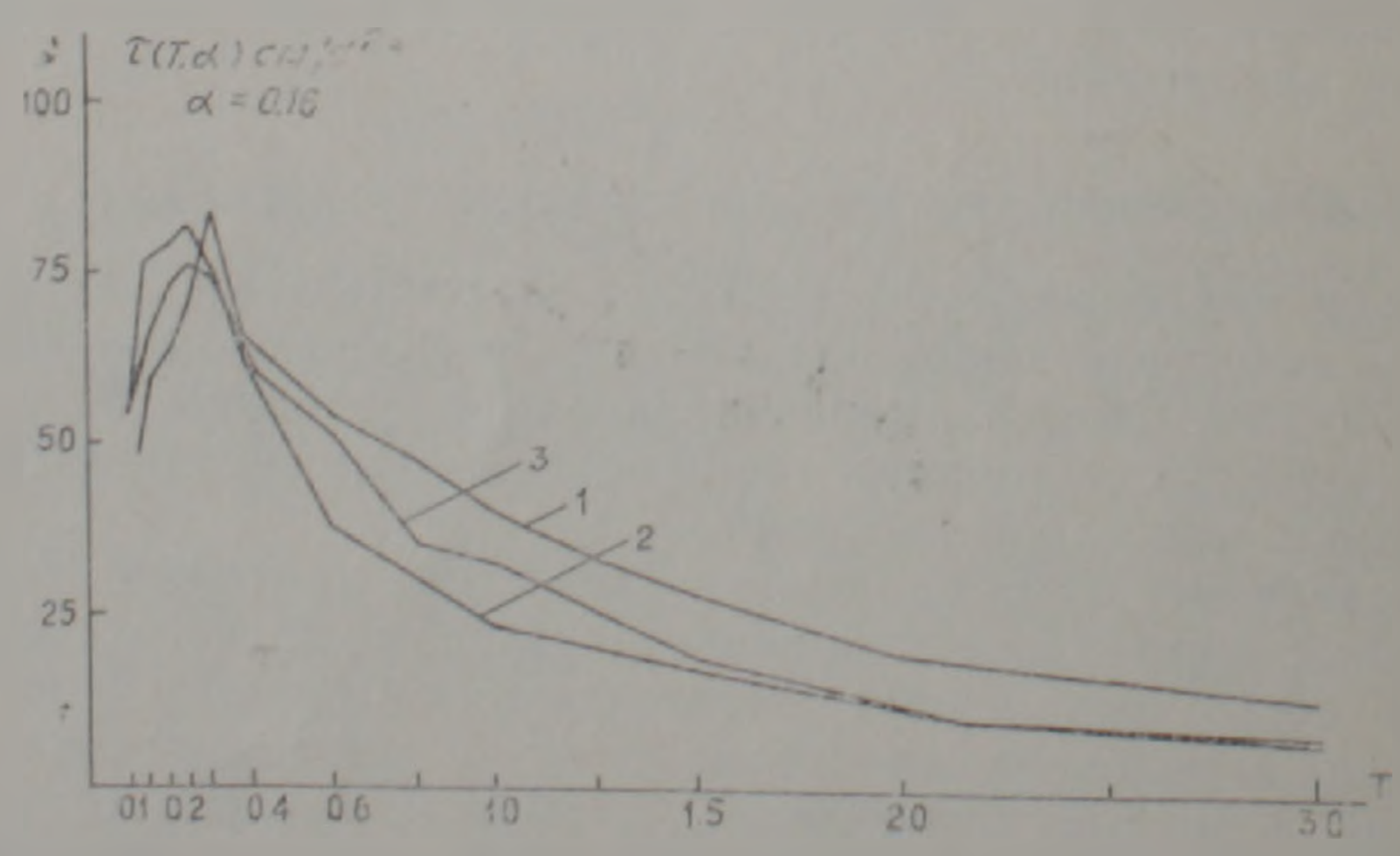

Рис. 2 Сопоставление средних спектров реакции.

полученной на основании анализа большого материала по сильным и разрушительным землетрясениям запада США [2]; 3—средний спектр реакции, полученный по 9-и акселерограммам сильных афтершоков Спитакского землетрясения ($M=4{,}4$; $\Delta \leqslant 15$ *км*). На рис. 2 приведены все сопоставляемые спектры. Хорошее совпадение спектров можно трактовать как относительно сходные условия генерации сейсмических возмущений. Однако более строгая постановка требует, во-первых, рассмотрения сравнительно большой статистики и, во-вторых, всестороннего изучения дополнительных факторов, формирующих сейсмический сигнал (например, глубины и механизма очагов, геологические и инженерно-геологические условия и т. д.). Кроме того, в данном случае сопоставлялись средние спектры реакции, которые достаточно грубо реагируют на исходные факторы. Поэтому, в дальнейшем в сопоставительный анализ должны будут привлекаться и Фурье-спектры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа данных сильных афтершоков Спитакского землетрясения 7 декабря 1988г. были выявлены некоторые закономерности в распределении динамических параметров воздействий и установлены качественные и количественные зависимости между этими параметрами и основными очаговыми характеристиками.

2. Произведен расчет спектров реакции акселерограмм, записанных в семи пунктах регистрации. Построен средний спектр $\tau(T, \alpha)$ для одинаковых энергетических величин.

3. Сравнительный анализ позволил выявить некоторые региональные особенности в распределении динамических параметров, в частности, от энергии и эпицентрального расстояния землетрясений. Сопоставление показало достаточно хорошую сходимость среднего спектра реакции, рассчитанного по сильным афтершокам Спитакского землетрясения, с расчетными, построенными при аналогичных очаговых параметрах.

Институт геофизики и инженерной
сейсмологии НАН РА

Поступила 29.VII.1993

Վ. Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ՍՊԻՏԱԿԻ ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԻ ՈՒԺԵՂ ՀԵՏՑՆՑՈՒՄՆԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ԳՐՈՒՆՏԻ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԻՆԺԵՆԵՐԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ ԵՎ ՆՐԱՆՑ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ամփոփում

Աշխատանքում բերվում են Սպիտակի երկրաշարժի ուժեղ հետցնցումների ժամանակ գրունտի տատանումների դինամիկ պարամետրերի բաշխվածության ուսումնասիրության և նրանց համեմատական վերլուծության արդյունքները։

Մասնավորապես ուսումնասիրվել են $K=11\div13$ *էներգիայի դասի հետցնցումները, որոնք գրանցվել են հիմնական ցնցմանը հաջորդող մի քանի ամսվա ընթացքում՝ սպասվող ռեժիմով աշխատող աքսելերոգրաֆների միջոցով։ Դիտարկվել են հետևյալ բնութագրերը.*

1—գրունտների մաքսիմում արագացումների բաշխվածությունը և նրանց կախվածությունը օջախի էներգիայից և էպիկենտրոնային հեռավորությունից, 2—մաքսիմում արագացումների պարբերությունների բաշխվածությունը և 3—ռեակցիայի սպեկտրների հաշվարկ և համեմատական գնահատում։ Ցույց է տրված, որ գրունտի արագացումների բաշխումը մոտ է նորմալ բաշխմանը և գտնվում է լավ համեմատության մեջ վեց բալ ինտենսիվության (այսինքն՝ համապատասխան ուժի) երկրաշարժերի արագացումների բաշխման գրաֆիկի հետ։ Դիտարկված բոլոր չորս հետցնցումների համար միջին A_{max} կազմում է 46,3 սմ/վրկ², շեղման ±14 արժեքի դեպքում։

$A_{max}=f(M)$ ֆունկցիոնալ կախումը էներգիաների մեծ տիրույթի համար ստացվում է այն դեպքում, երբ այդ կախվածության օրենքը ընդմիջարկվում է դեպի էներգիաների ավելի մեծ արժեքներ։ Ակնհայտ է, որ այս դեպքում գնահատված կախվածության վիճակագրական հավաստիությունը որոշ չափով նվազում է։

Պարզվել է, որ գրունտի մաքսիմում արագացումների կախվածությունը էպիկենտրոնային հեռավորությունից, տվյալ դեպքում ոչ լիովին է հրատակ (պետք է նկատի ունենալ այդ կախվածության անկայունության փաստը ընդհանրապես)։ Հետևելով $A_{max}=\Phi(\Delta)$ կախվածության գոյություն ունեցող օրինաչափությանը, տարված է մաքսիմում արագացում-հեռավորություն հեռավորությունից դեպի Δ-ների առավել մեծ արժեքները։ Ընդ որում, հաճախության բաշխումը եզրավորող կորը, որը բնութագրում է տվյալ կախվածությունը որակապես։ Այն էքսպոնենցիալ ձևով նվազող կոր է՝ սկսած մոտ մեմատական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ էպիկենտրոնային հեռավորության աճմանը զուգընթաց, արագացումների արժեքների նվազումը, տվյալ դեպքում, կատարվում է փոքր-ինչ ավելի արագ (միջին վիճակագրական տվյալների հետ համեմատած)։

Գրունտների, մաքսիմում արագացումների պարբերությունների $T_{ար}$ արժեքները գնահատվել են անմիջապես աքսելերոգրամներից։ $T_{ար}$-ի արժեքների փոփոխման տիրույթը գտնվում է 0,08-ից 0,4 վրկ. սահմաններում և ունի բավականին հստակ նորմալ բաշխում։ Առավել հաճախ հանդիպող արժեքներն են. 0,15—0,2 վրկ, որը, ի դեպ, բնութագրական է երկրաշարժերի տրվյալ էներգիաների դասի (K=11÷13) համար։

Ուժեղ հետցնցումների համար կատարված ռեակցիայի միջին սպեկտրների հաշվարկը և նրանց համեմատումը միջին կամ, այսպես կոչված, հաշվարկային սպեկտրների հետ (օջախների համարժեք պարամետրերի պայմաններում), ցույց տվեց, որ նրանք ունեն արժեքների բացահայտ ընդհանրություն, ինչպես ըստ ամպլիտուդների, այնպես էլ ըստ հաճախականության։

V. G. GRIGORIAN

ENGINEERING PARAMETERS OF GROUND OSCILLATIONS AT STRONG AFTERSHOCKS OF THE SPITAK EARTHQUAKE AND THEIR COMPARATIVE ANALYSIS

Abstract

In order to find out a distribution of dynamic parameters and to analyse them comparatively, the strongest aftershocks of the Spitak Earth-

quake with energies of $K=11\div13$, which were recorded by accelerographs operating in stand-by mode for the several last months after the main shock, were studied. Qualitative and quantitative dependences of engineering parameters on the focus characteristics were found. The comparison revealed the presence of some regional specific features in the dynamic parameters distributions. The medium spectra of strong aftershock responses fit well to the thearetical spectra calculated for similar focus parameters.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аптикаев Ф. Ф., Гладышева Г. С., Итон Дж., Нерсесов И. Л.** Связь параметров сейсмических колебаний при сильных и слабых землетрясениях.—В кн.: Советско-американские работы по прогнозу землетрясений. Том 2, кн. 2. Душанбе-Москва: Изд. «Дониш», 1979, с. 129—139.
2. **Григорян В. Г.** Зависимость спектра реакции от магнитуды и эпицентрального расстояния сильного землетрясения.—Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1983, т. XXXVI, № 1, с. 57—62.
3. **Григорян В. Г.** О возможности использования сейсмограмм местных слабых землетрясений для прогнозирования количественных параметров сейсмических воздействий.—Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1986, т. XXXIX, № 6, с. 36—43.
4. **Иванова Т. Г., Пономарева О. Н., Штейнберг В. В.** Ускорения колебаний грунта при землетрясениях.—В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 24, М.: «Наука», 1983, с. 39—52.
5. **Кранышин П. Н., Штейнберг В. В.** Параметры колебаний плотных грунтов при сильных землетрясениях.—В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 18, М.: «Наука», 1976, с. 23—35.
6. **Назаров А. Г., Дарбинян С. С.** Основы количественного определения интенсивности сильных землетрясений. Ереван Изд. АН АрмССР, 1974, 165 с.
7. Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 г. Сейсмологические исследования. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний. Вопросы инж. сейсмологии, вып. 31, М.: «Наука», 1990, с. 4—29.
8. **Сувилова А. В., Афанасьева В. В., Ярцева Н. С.** Об оценке параметров движения грунта при расчетах сейсмического риска.—В кн.: Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Изд. «Наука», 1975, с. 203—221.
9. **Чернов Ю. К., Соколов В. Ю., Юркевич Е. В.** Опыт количественных оценок сейсмической опасности территории в Приташкентском районе.—В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 28, М.: «Наука», 1987, с. 111—126.
10. **Штейнберг В. В.** Параметры колебаний грунтов при сильных землетрясениях.—В кн.: Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 27, М.: «Наука», 1986, с. 7—22.