

В. И. ХАЛТУРИН, Э. Г. ГЕДАКЯН, Л. А. МХИТАРЯН,
Н. М. САРГСЯН, А. М. ШОМАХМАДОВ

УСИЛЕНИЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ЛЕНИНАКАНЕ

В эпицентральной зоне Спитакского землетрясения 1988 г. и особенно в районе Ленинакана сейсмические колебания имели некоторые динамические особенности, которыми, по-видимому, объясняются неожиданно большой объем разрушений и их своеобразный характер. Мы попытались выявить эти особенности на основе анализа инструментальных и макросейсмических данных, полученных по более слабым землетрясениям.

Полученные данные необходимо также учитывать и при микросейсмораионировании Ленинакана и других территорий со сложим типом строения верхней части разреза.

1. По данным обследования [4] при Спитакском землетрясении в Ленинакане на расстоянии 35 км сотрясения достигали 9 баллов, тогда как в Кировакане (25 км)—менее 8. Резко различен и характер повреждений. Из числа многоэтажных каркасно-панельных зданий в Ленинакане разрушено 95%, тогда как в Кировакане устояли все. Процент полностью или частично разрушенных каркасно-каменных домов в Ленинакане составляет 62, а в Кировакане 24. В то же время для домов каменной кладки (до 4 этажей) доля разрушенных домов примерно одинакова в обоих городах.

Примечательное разрушение в Ленинакане многоэтажных зданий с относительно большим периодом собственных колебаний при равенстве разрушений зданий с меньшим периодом свидетельствует о проявлении резонансных явлений в Ленинакане и связанных с ними спектральных особенностях колебаний в этом городе по сравнению с Кироваканом и другими пунктами.

2. Масштаб разрушений в Ленинакане явно выше, чем можно было ожидать, исходя из магнитуды M_{LN} этого землетрясения и из его макросейсмической магнитуды M_{MC} [2]. M_{MC} определяется из совокупности макросейсмических данных землетрясения во всех пунктах, приведенных к гипорасстоянию 30 км с помощью региональной кривой затухания. Известно, что затухание макросейсмической интенсивности в Закавказье происходит сильнее, чем в Средней Азии и на Балканах (рис. 1).

Данные о зависимости $I(R)$ для Спитакского землетрясения (рис. 2) хорошо соответствуют региональной кривой. Из этих данных следует, что $M_{MC}=7,8$, и на расстоянии 35 км ожидается $I=7,6$ балла.

Значения M_{MC} землетрясений Кавказа корреляционно связаны с их магнитудой соотношением:

$$M_{MC}=1,12 M_{LN}+0,20, \quad (1)$$

что примерно на единицу выше, чем дают аналогичные соотношения в Средней Азии:

$$M_{MC}=1,19 M_{LN}-1,10 \quad (2)$$

и на Балканах:

$$M_{MC}=1,20 M_{LN}-0,76. \quad (3)$$

Согласно соотношению (1) для Спитакского землетрясения M_{MC} должно быть 8,0 и ожидаемая интенсивность для Ленинакана 7,8 балла.

Реальная интенсивность в Ленинакане была около 9 баллов. Повышенная интенсивность в Ленинакане и севернее него отмеча-

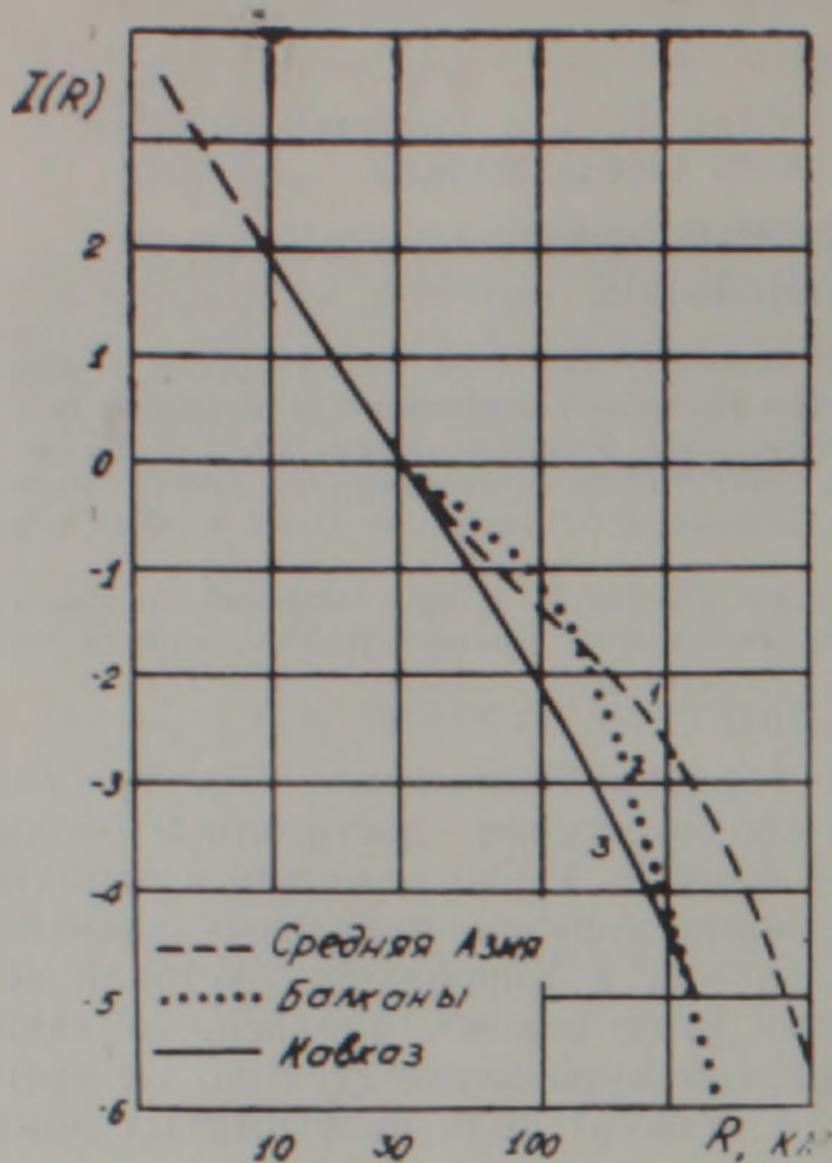


Рис. 1. Калибровочные кривые затухания балльности с расстоянием для трех регионов: Средней Азии, Балкан и Кавказа.

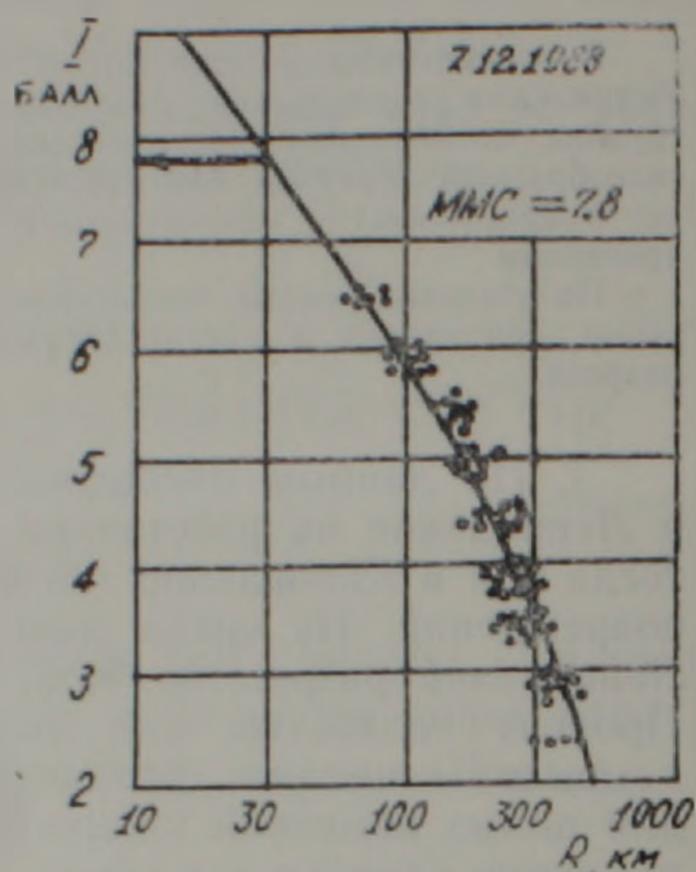


Рис. 2. Зависимость балльности от расстояния при Спитакском землетрясении декабря 1988 г. для восточного и юго-восточного направлений по данным Р. Шафадияева. График аппроксимирован калибровочной кривой, полученной для Кавказа (рис. 1). Горизонтальной стрелкой указано значение макросейсмической магнитуды ММС.

лась и при других сильных землетрясениях прошлого. Так, при землетрясении 30 января 1967 г., очаг которого практически совпадал с очагом Спитакского, в Ленинакане и северо-западнее него, по данным А. Х. Баграмяна, четко выделяется область повышенной интенсивности. На детальной макросейсмической карте Спитакского землетрясения (рис. 3) девятибалльная зона лежит в пределах Ленинакана и севернее него. Южнее, примерно на таких же расстояниях, сотрясения были 7,5 баллов, что соответствует ожидаемым величинам. Балльность уменьшается и в направлении эпицентра и лишь с расстояния 25 км и менее начинает возрастать.

По данным многих землетрясений прошлого, интенсивность в Ленинакане в среднем оказывается завышенной на один балл по сравнению с ожидаемой из уравнения (1) и кривой затухания балльности:

$$\Delta I = I_{\text{лен}} - I_{\text{ср}} = 1.$$

По инструментальным данным, станция Ленинакан завышает значения энергетических классов K на единицу класса:

$$\Delta K = K_{\text{лен}} - K_{\text{ср}} = 1 = 0,56 \lg A.$$

3. Сравним записи афтершоков в Ленинакане и в Степанаване, находящихся примерно на одинаковых расстояниях от эпицентра. На записях афтершоков в Степанаване видны четкие вступления P и S волн со сравнительно быстро убывающим «шлейфом». В Ленинакане вступления нечетки, после волны S амплитуды колебаний резко нарастают

и образуется продолжительный, до 30–40 с, интерференционный цуг с амплитудами в 3–6 раз большими, чем у S волны. В то же время в Степанаване длительность группы максимальных амплитуд не превышает 1–2 с (рис. 4).

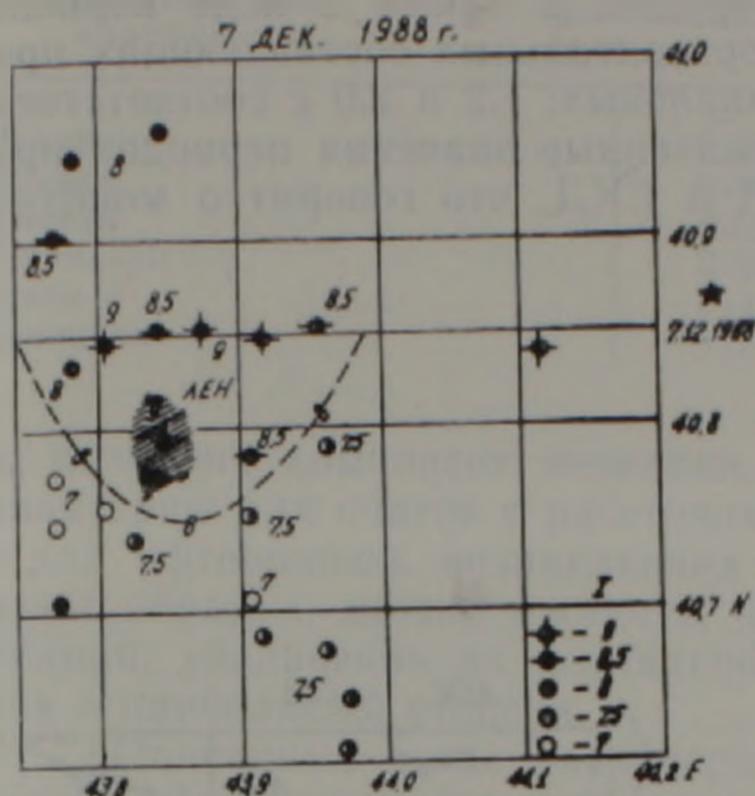


Рис. 3. Карта макросейсмических проявлений при Спитакском землетрясении 7 декабря 1988 г. для района Ширакской котловины и ее окрестностей.

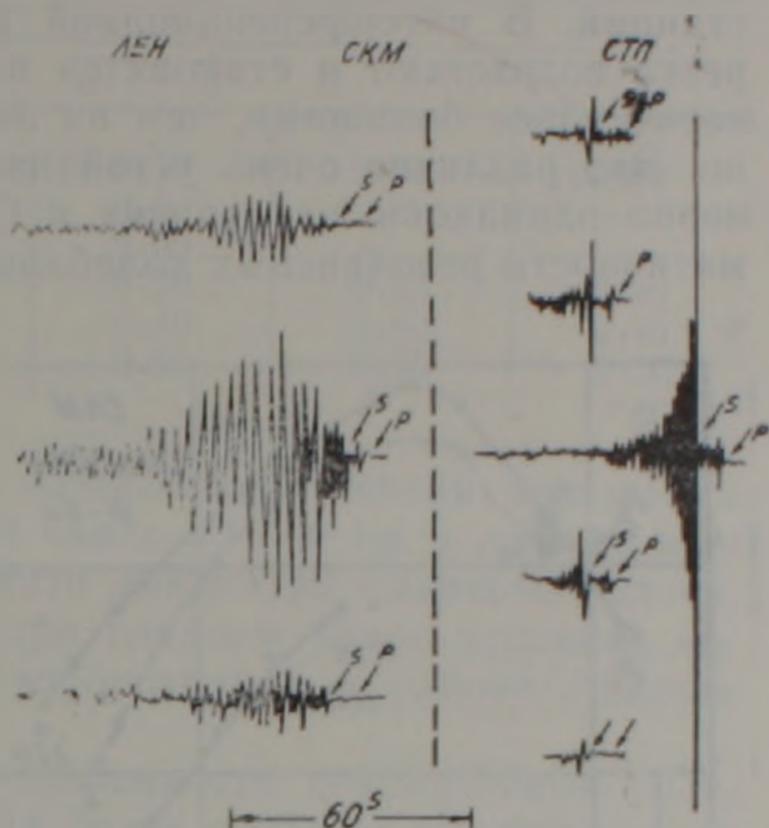


Рис. 4. Образцы записей афтершоков Спитакского землетрясения приборами СКМ станций Степанаван (справа) и Ленинанкан (слева).

Абсолютный уровень амплитуд в интерференционной группе и в последующих участках коды на станции Ленинанкан в 10–15 раз больше, чем в Степанаване. Это видно на примерах записей как короткопериодной аппаратуры СКМ, так и длиннопериодной СКД (рис. 5).

Интерференционные группы отчетливо видны на записях взрывов, производящихся на территории города для разрушения зданий, непригодных для эксплуатации. На записях взрывов длительность интерференционных групп достигает 20 с.

4. Абсолютный уровень амплитуд коды на станции Ленинанкан намного, в 10–15 раз, превышает коду в Степанаване (рис. 5). При этом амплитуды на вертикальной компоненте коды убывают во времени быстрее, чем на горизонтальной (рис. 5 и 6).

Резкое завышение амплитуд коды в Ленинанкане проявляется в сравнении не только со Степанаваном, но и с другими сейсмическими станциями Армении. В табл. 1 приведены результаты оценки этого завышения по величинам станционных отклонений C_1 уровня коды от того, который соответствует средним корреляционным соотношениям между магнитудой M_{LN} и уровнем коды при некотором фиксированном времени $t=100$ с (для записей СКМ) и $t=1000$ с (для записей СКД):

$$C_1 = \lg(2A_{100}) - 4.0 - M_{LN} \text{ для СКМ}$$

и

$$C_{01} = \lg(2A_{1000}) - 4.75 - M_{LN} \text{ для СКД.}$$

Как видно из таблицы 1, отклонения уровня коды в Ленинанкане очень большие, особенно для СКМ и для горизонтальных компонент. Несколько меньшие, но значительные отклонения наблюдаются и на станции Ереван.

5. Важно отметить, что на записях станции Ленинанкан уровень коды на горизонтальных составляющих в ряде случаев в 2–2.5 раза больше, чем на вертикальных (рис. 5 и 6).

Другой характерной особенностью записей станции Ленинакан является различие в частотном составе интерференционной группы, а также коды на вертикальной и горизонтальной компонентах (рис. 6). Для объемных волн периоды на записях всех составляющих примерно одинаковы и не отличаются сколь-нибудь заметно от других станций. В интерференционной же группе, а также в коде периоды резко возрастают и становятся на горизонтальных составляющих примерно вдвое большими, чем на вертикальных: 1.2 и 2.0 с соответственно. Это различие очень устойчиво, указанные значения периодов примерно одинаковы на записях и СКМ и СКД, что говорит о монохроматичности резонансных колебаний.

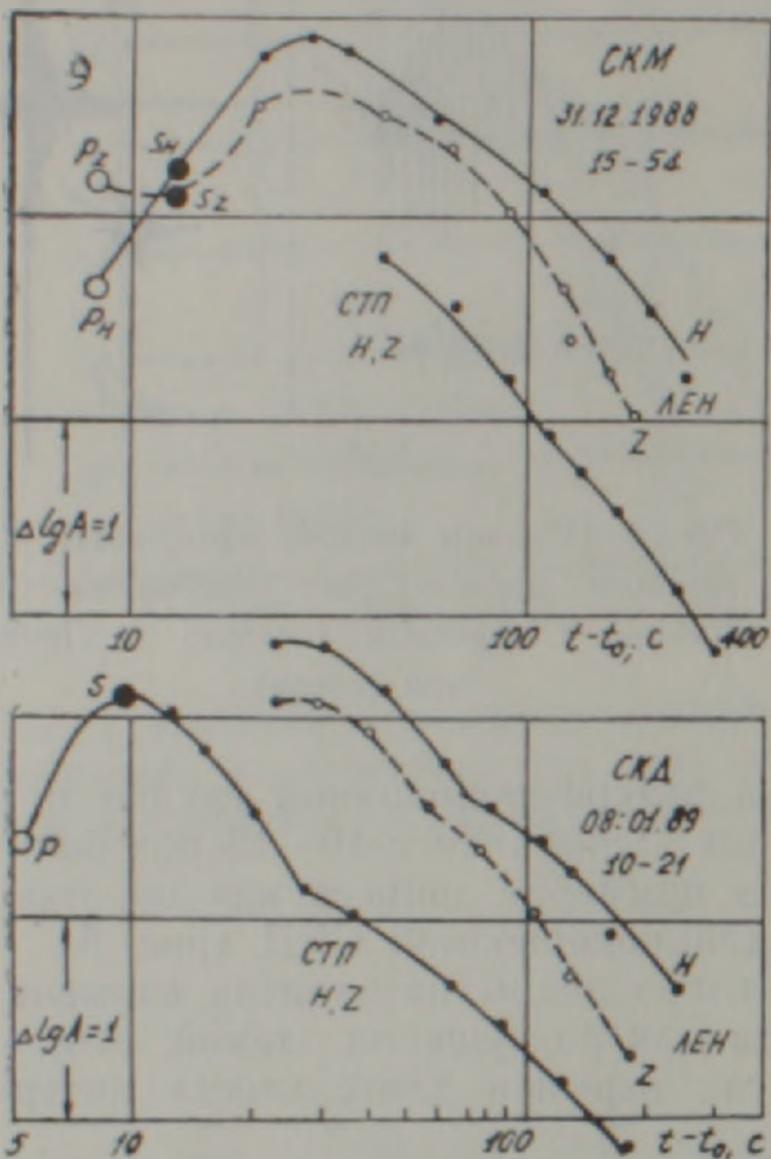


Рис. 5 Сравнение огибающих записей афтершоков на станциях Ленинакан и Степанаван приборами СКМ (вверху) и СКД (внизу). Крупными значками показаны вступления объемных P и S волн. Для огибающей станции Ленинакан отдельно даны огибающие коды вертикальной Z (пунктир, не залитые точки) и горизонтальной H (сплошная линия, залитые точки) составляющей. На записях станции Степанаван уровень и форма огибающих коды всех трех компонент в среднем одинакова.

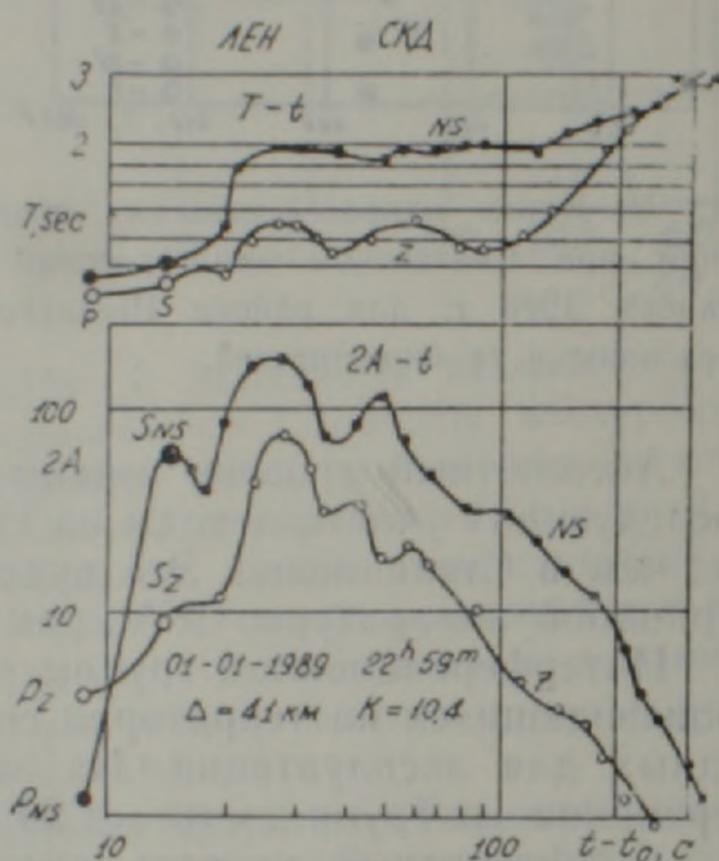


Рис. 6 Сравнение периодов (вверху) и амплитуд объемных волн и коды (внизу) вертикальной и горизонтальной компонент. Запись афтершока 1 января 1989 г. приборами СКД станции Ленинакан.

6. Искажения структуры сейсмических колебаний, интенсивность интерференционной группы существенно зависят от азимута и угла подхода сейсмического луча, т. е. от того, где относительно Ленинакана расположен очаг.

Местные землетрясения, возникающие вблизи Ленинакана, эпицентральные расстояния которых порядка их глубины, искажаются в значительно меньшей степени, интерференционная группа у них слаба, не превышает по уровню волну S и сравнительно короткопериод-

Таблица 1
 Стационарные отклонения уровня воды (лог. ед.) для приборов СКМ и СКТ некоторых сеймостанций Армении для горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент

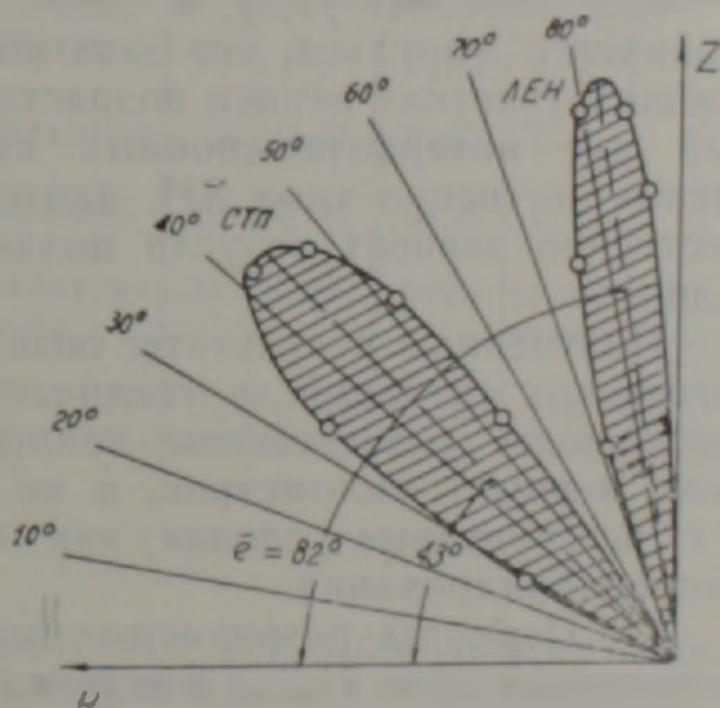
Тип прибора компонента	СКМ		С	
	H	Z	H	Z
Каджарин	0.15	-0.30	-0.10	0.000
Мецамор	0.10	0.00	—	—
Иджеван	0.05	0.00	—	—
Степанаван	0.25	0.20	0.25	0.00
Ереван	0.45	0.40	0.60	0.40
Ленинакан	1.20	0.95	0.90	0.50

на, различия компонент невелики. В наибольшей степени искажения характерны для очагов с расстояниями около 40—60 км и прежде всего для афтершоков, возникающих вблизи эпицентра главного толчка. Таким образом, можно ожидать, что при главном ударе усиление колебаний, увеличение их длительности происходило в районе Ленинакана в наибольшей степени.

7. Описанные выше характерные особенности сейсмических колебаний в Ленинакане сохраняются и для более сильных землетрясений.

Для примера сравним параметры записей механических сейсмографов в двух пунктах—Ленинакане и Бакуриани при сильном Параванском землетрясении 13 мая 1986 г. ($M_{LN}=5,7$ и $M_{PVA}=6,1$), которое ощущалось в Ленинакане с силой 5—6 баллов. Хотя Ленинакан находится почти вдвое дальше от эпицентра (75 км), чем Бакуриани (40 км), тем не менее амплитуды волн S в Ленинакане в 3,5 раза, а максимальные—почти в 6 раз больше (6000 МКМ и 1100 МКМ) и в Бакуриани. Длительность участка больших амплитуд в Бакуриани менее 10 с, а в Ленинакане достигает почти минуты. Периоды колебаний в Ленинакане в 1,5—2,2 раза больше.

Рис. 7. Гистограмма распределения углов выхода сейсмического луча на станциях Степанаван и Ленинакан для группы афтершоков Спитакского землетрясения.



8. Устойчивой особенностью ленинаканских записей являются очень крутые углы подхода сейсмической радиации к поверхности. Это бросается в глаза при рассмотрении отдельных записей. Первичные вступления волны P на горизонтальных компонентах в 10—15 раз меньше, чем на вертикальной, тогда как в Степанаване их соотношение близко к единице. Гистограммы распределения углов выхода этих станций полностью разделяются, средние значения углов равны 82° и 43° соответственно (рис. 7)

9. Уровень микросейсм на станции Ленинакан в 10—15 раз выше, чем в Степанаване (табл. 2). Это различие не может быть объяснено интенсивностью источников техногенных помех, так как обе станции

находятся в черте города. Оно сохраняется как в дневное, так и в ночное время и проявляется как на горизонтальных, так и на вертикальных компонентах.

Таблица 2

Амплитуды и периоды микросейсм на записях приборов СКМ станций Ленинанкан и Степанаван

Время суток	Компонента	Станции				Отношение амплитуд Лен Стп
		Ленинанкан		Степанаван		
		T, с	2A, мк.м	T, с	2A, мк.м	
Днем	H	0.4	0.4	0.8	0.021	16
Днем	H	0.6	0.5	1.0	0.040	12
Днем	Z	0.4	0.6	0.8	0.030	20
Днем	Z	0.4	0.8	1.0	0.040	20
Ночью	H	0.6	0.2	1.0	0.020	10
Ночью	Z	0.5	0.3	1.0	0.020	15

10. Все перечисленные выше особенности сейсмических колебаний в районе Ленинанкана хорошо объясняются влиянием местных геологических условий. Как известно, Ленинанкан расположен в Ширакской котловине, в основании которой лежат туфы и базальты и которая заполнена озерными отложениями, песком, гравием, суглинками и вулканическим пеплом, а также тонкими прослойками туфа и базальта. В пределах города мощность этой резко стратифицированной толщи составляет 300—500 м. Эта толща вытянута в северном и северо-западном направлении на 20—30 км и выклинивается в южном и юго-восточном направлении. По существу эта котловина есть долина р. Ахурян, которую в четвертичное время неоднократно перекрывали вулканические излияния Арагаца, в результате чего периодически возникали озера с накоплением осадков.

Представляется, что именно эта стратифицированная толща ответственна за усиление макросейсмического эффекта.

Как известно [1,3], в таких условиях происходит трансформация первичного импульса, его затягивание. Амплитуды колебаний в последующих участках записи возрастают в несколько раз, образуется мощный дуг интерференционных квази-монохроматических колебаний, преимущественно типа SH, длительность и интенсивность которых существенно зависят от угла подхода сейсмических лучей к основанию толщи.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в ряде геологических ситуаций за увеличение амплитуд колебаний и их продолжительность ответственны толщи мощностью порядка первого (или даже первых) километров, а не свойства двух-трех десятков метров, т. е. не грунтовые условия, как это принято в традиционных подходах микрорайонирования.

11. Периоды резонансных колебаний, доминирующие в интерференционном дуге (1,2 с в вертикальной и 2 с в горизонтальной компонентах) значительно превышают периоды колебаний многоэтажных зданий, которыми был застроен Ленинанкан. Так, период свободных колебаний девятиэтажных каркасно-панельных зданий обычно находился в интервале 0,5—0,6 с. Для более высоких зданий (в 12 и 16 этажей) периоды были несколько больше (0,85—1,0 с). Эти значения заметно меньше тех периодов, которые доминируют в интерференционных группах колебаний, описанных выше. Однако, мы полагаем, что в процессе колебаний здания постепенно теряли свою несущую способность, прочность их падала, а значения собственных периодов зданий возрастали. В результате периоды колебаний почвы и собственные периоды зданий сближались, вклад резонансных явлений в течение сейсмического процесса возрастал, происходило как бы подстраи-

ние периода зданий к периоду почвы. В конце концов возникали сильные разрушения и даже коллапс зданий.

Длительность колебаний с большой амплитудой (смещения не менее 50—100 мм) была в Ленинакане никак не меньше 60 с и, возможно, достигла 80 с. Об этом говорят не только приведенные выше оценки длительности записей слабых (30—40 с) и умеренных толчков (до 60 с), но и анализ немногочисленных записей сильных движений, полученных в Ленинакане, и рассказы многочисленных свидетелей.

Близвертикальный выход сейсмического луча привел к тому, что в первой группе колебаний, где доминировали волны Р, колебания были чисто вертикальными с периодом 1—2 с. Затем они сменились горизонтальными колебаниями большей амплитуды с периодами 2—3 с. Первая группа колебаний привела к развитию существенных повреждений и ослаблению связей, в течение второй стадии в полной мере проявились резонансные явления и произошли разрушения.

Правдоподобность такой реконструкции подтверждается существенным (в 2—3 раза) увеличением периодов некоторых зданий, получивших сильные повреждения, но все же устоявших во время землетрясения. Впоследствии эти здания (кроме гостиницы «Ширак») были снесены, как потерявшие несущую способность.

После землетрясения методом оттяжки нами были измерены периоды свободных колебаний ряда поврежденных зданий. Для тех зданий, периоды которых измерялись также и до землетрясения, сравнительные данные приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Периоды свободных колебаний в направлении вдоль здания (Х) и поперек (У), измеренные до и после Спитакского землетрясения

№	Тип здания	Кол-во этажей	Периоды свободных колебаний			
			до		после	
			T _x	T _y	T _x	T _y
1	Гостиница «Ширак» Монолитный железобетонный каркас	13	1.0	0.95	1.6	—
2	Сборный железобетонный каркас из И-образных конструкций, серия III	9	0.55	0.55	1.8	—
3	Железобетонное с рамно связанным каркасом, построенное методом подъема этажей	16	0.97	0.95	1.34	—
4	Гостиница «Куманри» Монолитный железобетонный каркас трех этажей, вышесборные из И-образных конструкций.	11	0.90	0.95	разрушено	—
5	Крупно-панельное	9	0.55	0.55	1.6	—
6	Крупно-панельное	9	0.60	0.55	0.90	0.95*

* Измерения японских специалистов.

а) Приведенные данные показывают, что усиление сейсмических колебаний в Ленинакане, увеличение их длительности обусловлено в первую очередь геологическим строением мощной полуклометровой, сильно расчлененной осадочной толщи, а не свойствами грунтов первых 15—20 метров или уровнем грунтовых вод, как это принято считать в традиционном методе микрорайонирования. В данном случае грунтовые условия имеют подчиненное значение.

б) Резонансные колебания сыграли значительную роль в повреждении и разрушении многоэтажных зданий Ленинакана. Здесь по существу повторился урок Мехико-сити (1985). Колебания были весьма длительными (более 60 с), и это позволило зданиям в процессе развития повреждений «перестроиться» на большие периоды. Возможность такого хода событий необходимо учитывать в теории сейсмостойкости зданий.

в) В практике детального сейсморайонирования в ряде геологических ситуаций совершенно необходимо применять геофизические и в первую очередь сейсморазведочные исследования строения верхних этажей земной коры. Наиболее информативным в таких случаях будет метод вертикального сейсмического профилирования с последующим моделированием интерференционных колебаний, формирующихся в такой среде.

г) Привлечение записей слабых землетрясений позволяет в полной мере предсказать эффекты усиления и затягивания колебаний в группе максимальных амплитуд при сильных землетрясениях. Поэтому в практике микрорайонирования таких территорий предпочтительна прямая регистрация слабых событий (местных землетрясений или взрывов). Неизбежным элементом таких наблюдений должно быть наличие эталонной (опорной) станции, расположенной вне осадочной зоны, на выходах кристаллических пород.

д) При микрорайонировании в качестве индикатора усиления колебаний могут быть дополнительно использованы следующие параметры записей:

—угол выхода сейсмического луча,

—различия спектрального состава и уровня вертикальной и горизонтальной компонент движения почвы,

—различия уровня и спектрального состава коды местных землетрясений относительно опорного пункта наблюдения.

е) Применительно к проблеме восстановления и застройки Ленинакана основной результат, вытекающий из сделанной работы, состоит в том, что выбранное ныне северо-западное направление строительства города на мощной толще развитых здесь осадочных отложений является ошибочным и опасным. На наш взгляд, для развития города предпочтительнее южное и юго-западное направление. Однако решение должно приниматься на основе результатов детального исследования строения верхних этажей коры на территории города и его окрестностей, а также наблюдений сейсмических колебаний в различных частях города. Следует также провести глошадные расчеты формирования волновой картины и, в частности, цуга интерференционных колебаний в разных пунктах территории при различных расположениях очагов.

ж) Из предварительных данных об углах выхода и завышения уровня коды следует, что и в Ереване можно ожидать возникновение резонансных явлений, хотя и в меньшей степени, чем в Ленинакане. Следует и на территории столицы республики выполнить детальные сейсморазведочные работы, а также провести в разных частях города наблюдения местных землетрясений и карьерных взрывов (которые систематически проводятся в окрестностях города).

Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН Армянской ССР

Поступила 29.IX.1969

Վ. Ի. ԽԱՆՈՒՐԻՆ, Է. Գ. ԴՅՈՂԱԿՅԱՆ, Լ. Ա. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ, Ն. Մ. ՍԱՐԴՍՅԱՆ,

ՄԱԿՐՈՍԵՅՍՄԻԿ ԱԶԿԵՑՈՒԹՅԱՆ ՈՒԺԵՂԱՑՈՒՄԸ ԼԵՆԻՆԱԿԱՆՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

1988 թ. Սպիտակի երկրաշարժի կալիկենոտրոնային գոտում և հատկապես Լենինականի տարածքում, սեյսմիկ տատանումներն ունեցել են մի քանի դինամիկ առանձնահատկություններ, որոնցով և, ըստ երևույթին, բացատրվում են մեծ ծավալի սվերածությունները և դրանց յուրօրինակ բնույթը:

Մենք փորձել ենք բացահայտել այդ առանձնահատկությունները, հիմնվե-

յով ավելի թույլ երկրաշարժերից ստացված մակրոսեյսմիկ և գործիքային տվյալների վերլուծության վրա:

Ստացված տվյալներն, անշուշտ, անհրաժեշտ կլինեն հաշվի առնվելու Հենինական քաղաքի և այն տարածքների միկրոշրջանացման աշխատանքների ընթացքում, որոնք կտրվածքի վերին մասում ունեն նույնատիպ կառուցվածք:

V. I. KHALTURIN, E. G. GUEODAKIAN, L. A. MKHITARIAN, N. M. SARGSIAN,
A. M. SHOMAKHMADOV

INTENSIFICATION OF THE MACROSEISMIC EFFECT IN LENINAKAN

A b s t r a c t

On the basis of weak earthquakes instrumental and macroseismic data analysis the characteristic peculiarities of vibrations in the Leninakan region are revealed, which explain the unexpectedly great volume and the resonance character of buildings destruction in Leninakan during the Spitak earthquake of December 7, 1988. The intensification of the macroseismic effect is stipulated by the thick sedimentary series influence, on which the town is placed in which a prolonged wave train of intensive interference vibrations has formed.

There are given recommendations on the macroseismic zoning methods and on the Leninakan development more safe directions choice.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ратникова Л. И. Поляризация фильтрация сейсмических волн слоистыми упругими средами. Вычисленная сейсмология. № 19, М.; Наука, 1986, с. 155—167.
2. Раутян Т. Г., Доцев Н. Т., Саргсян Н. М. Макросейсмическая магнитуда. Вопросы инж. сейсмологии, вып. 30, 1989.
3. Borchardt R. D., Gibbs J. F. Effect of local geological conditions in the San Francisco bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake, Bull. Seism. Soc., Am. 66, 1976, p. 467—500.
- 4 Results and data from seismologic and geologic studies of the earthquake of December 7, 1988, near Spitak, Armenia, USSR. US Geol. Surv., Open-file report 89-16, vol. 1—5 1988 pp.